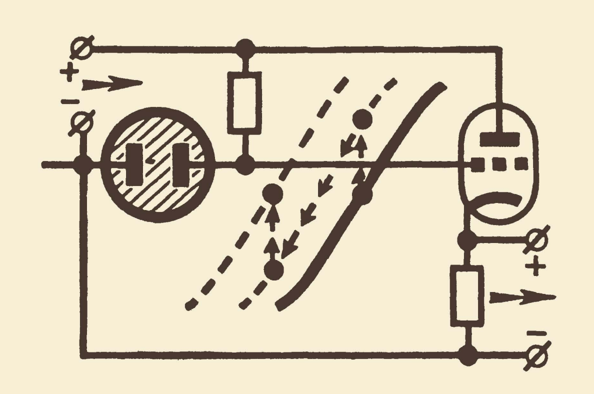
МАССОВАЯ РАДИО-БИБЛИОТЕКА

Г. К. БОРХВАРДТ

ЛАМПА С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ



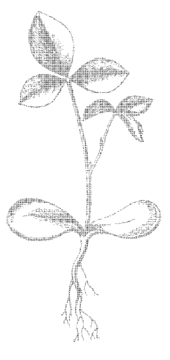
Госэнергоиздат

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 179

Г. К. БОРХВАРДТ

ЛАМПА С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1953 ЛЕНИНГРАД

В брошюре, рассчитанной на подготовленного радиолюбителя, рассматриваются газоразрядные лампы с холодным катодом. Основная часть брошюры посвящена стабилизаторам напряжения тлеющего разряда и электронным регуляторам напряжения.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *П. Н. Чистяков* Технич. редактор *И. М. Скворцов*

Сдано в набор 19/III 1953 г. Подписано к печати 19.V 1953 г.
Бумага 84×108 3,28=п. л. Уч.-изд. л. 3,6
Тираж 15 000 экз. Заказ № 91
Т-02862 Цена 1 р. 45 к.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Почти все современные огни есть огни электрические. Именно электричество создало богатство световых эффектов. Но и тайны самого электричества познавались благодаря в значительной степени свету и световым эффектам, благодаря тяге к свету человека вообще и ученых в частности.

Светящиеся гнилушки, блуждающие огоньки на болоте, живые светлячки, своеобразное свечение гниющего мяса и рыбы, — все эти загадочные, чудесные явления природы издавна занимали человека. Познать тайну этих явлений, обратить их на службу народу, дать народу эффективные искусственные источники света, — такую задачу ставит перед собой ученый. Не просто наблюдать, а обратить наблюдаемое явление в источник знаний для народа, — такую задачу поставил перед собой замечательный русский ученый, основоположник электротехники в России, скромный труженик и блестящий профессор Василий Владимирович Петров (1761—1834 гг.).

Академик С. И. Вавилов в предисловии к книге «Академик В. В. Петров» писал: «В истории русской физики до половины XIX в. В. В. Петров не только хронологически, но и по своему значению непосредственно следует за М. В. Ломоносовым. Имя и дело этого замечательного ученого, организатора русской физики и ее преподавания, должно быть прочно сохранено в памяти советских физиков и техников».

В. В. Петров с 90-х годов XVIII в. начал работу в области люминесценции, наблюдая за свечением гниющих растений. Его работа: «О фосфорах прозябаемого царства и об истинной причине свечения гнилых дерев» и последующие исследования свечений «фосфоров из царства ископаемого» свидетельствуют о глубоком интересе к световым явлениям и экспериментаторской настойчивости ученого.

Огромная заслуга В. В. Петрова перед человечеством заключается в открытии им электрической дуги (1802 г.). В. В. Петров первый создал мощные первичные электрические элементы, пытаясь найти практическое приложение открытого в те годы интересного физического явления — явления электрического тока.

До В. В. Петрова опыты с электрическими элементами носили чисто физический характер. Любовь к исследованию световых явлений остановила внимание ученого на эффекте, который мог бы остаться незамеченным в других условиях, на явлении покраснения металлической нити, по которой протекал электрический ток. В. В. Петров плавил металл, восстанавливал металл из окислов, составляя электрическую цепочку, в которую включал древесные угольки и получал световые эффекты. В одной из своих статей В. В. Петров пишет, что «если подвести к углям провода от мощной батареи и сближать их, то является между ними весьма яркого белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлительнее загораются и от которого темный покой довольно ярко освещен быть может».

Условия, в которых жил и работал В. В. Петров, косность и сознательное препятствие развитию работ ученого со стороны царской Академии наук, где предпочтение отдавалось иностранцам, не дали возможности автору замечательных исследований при жизни найти практическое применение столь важным открытиям. Только после Великой Октябрьской социалистической революции осуществились надежды замечательного русского ученого, писавшего: «Я надеюсь, что просвещенные и беспристрастные физики, по крайней мере некогда, согласятся отдать трудам моим ту справедливость, которую важность сих последних заслуживает». Теперь мы являемся свидетелями широкого технического применения электрической дуги и других видов электрических разрядов.

Целая плеяда русских электротехников XIX столетия работала над применением электрического тока для освещения и для других целей. П. Н. Яблочков (1847—1894 гг.) применил электрическую дугу для мощных осветительных ламп. А. Н. Лодыгин (1847—1923 гг.) создал впервые в мире в 1873 г. лампу накаливания. Н. Н. Бенардос (1842—1905 гг.) применил электрическую дугу для сварки металлов Н. Г. Славянов (1854—1897 гг.) предложил спо-

соб электрической отливки металлов и развил метод электрической сварки, предложенный Бенардосом, применив вместо угольных электродов металлические.

Почти столетием позже, после изобретения электрической дуги, замечательный русский ученый Александр Степанович Попов (1859—1906 гг.) дал миру чудеснейшее средство общения на расстоянии — радио.

В первых радиопередатчиках тоже применялся электрический разряд, но не дуговой, а искровой, не для создания искусственного света, не для сварки металлов, а для создания тока высокой частоты. Так благодаря трудам лучших в мире русских электротехников электрический разряд все шире и шире применялся для практических целей, на пользу народу. Так мечты ученого В. В. Петрова превращались в действительность.

Начало XX в. знаменовалось бурным развитием электротехники, а в связи с изобретением радио особенное значение приобрели исследования электрического разряда. Блестящие результаты дали исследования токопрохождения через разреженное пространство, через различные газы и смеси газов. Появились газоразрядные приборы.

В области создания и практического применения газоразрядных приборов, которые получили название ионных приборов, много и плодотворно работали акад. А. А. Чернышев, проф. В. П. Вологдин, проф. М. А. Бонч-Бруевич и другие советские ученые.

В группе газоразрядных, ионных приборов особый интерес представляют газоразрядные приборы с холодными электродами, получившие название приборов с холодным или тлеющим разрядом. По внешнему виду и конструкции баллона такие приборы во многом напоминают радиолампы. Однако конструкция электродов этих приборов значительно отличается от конструкции электродов электронных ламп (радиоламп). Как известно, в радиолампе один из электродов (катод) разогревается током от внешнего источника. Делается это для того, чтобы выделить свободные электроны из разогретой, обычно тонкой, металлической нити катода. В ионном приборе с тлеющим разрядом ни один из электродов не разогревается, однако свободные электроны в нем существуют, и электрический разряд при некоторых условиях происходит. Такой прибор в отличие от ламп с накаленным катодом можно назвать лампой с холодным катодом.

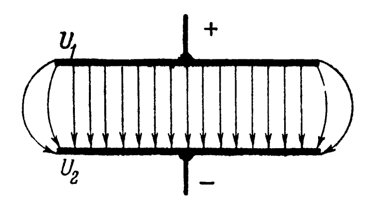
К числу ламп с холодным катодом относятся не только приборы с тлеющим, но и с дуговым разрядом (холодная дуга в парах металлов), а также некоторые приборы без газового заполнения (фотоэлементы).

Физические явления в лампах с холодным катодом, свойства этих приборов и практические приложения некоторых из них в электрических схемах и рассматриваются в дальнейшем.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД

Электрическим разрядом называется явление прохождения электрического тока через проводимость. Для того чтобы искусственно создать такой разряд, нужно иметь источник с запасом электричества и проводимость. Тогда при присоединении проводимости к источнику электричество потечет через проводимость.

Классическим аккумулятором электричества, т. е. устройством, способным скапливать электричество, является конденсатор. Две параллельные металлические пластины, разделенные электрическим изолятором (конденсатор), возможно зарядить некоторым количеством электричества (способов заряда пока касаться не будем).



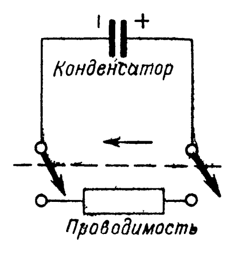
Фиг. 1. Силовые линии электрического поля в плоском конденсаторе.

Свойства заряженного конденсатора кратко могут быть описаны следующим образом. Пластины заряженного конденсатора имеют на себе электрические заряды противоположных знаков (фиг. 1). Поскольку физические свойства электрических зарядов таковы, что заряды противоположных знаков стремятся притянуть друг друга, в пространстве между пластинами конденсатора будут существовать электрические силы. Пространство, в котором действуют электрические силы, называется электрическим полем. Чем больше будет зарядов на пластинах (обкладках) конденсатора, тем сильнее будет электрическое поле между ними, т. е. тем больше запас потенциальной энергии этого поля.

Как всякое другое поле, электрическое поле может производить работу. Способность электрического поля конден-

сатора производить работу (перемещать электрические заряды) полностью определяется разностью электрических потенциалов пластин. Разность потенциалов (или напряжение источника) обозначают через $U_1 - U_2$, понимая под U_1 потенциал одной, а под U_2 потенциал другой пластины конденсатора. Поскольку разность потенциалов, выраженная численными значениями, будет сама выражена определенным числом, ее чаще обозначают через U. Так, например, если одна из пластин конденсатора присоединена к земле и потенциал ее $U_2 = 0$ (потенциал земли условно принято считать равным нулю), а другая заряжена до величины $U_1 = 200$ *в*, то $U_1 - U_2 = 200 - 0 = 200$ *в*.

Если теперь к заряженному конденсатору присоединить проводимость, как это показано на фиг. 2, то произойдет электрический разряд конденсатора, т. е. через проводимость потечет электрический ток. Условно принято, что во внешней цепи ток протекает от более высокого потенциала источника к более низкому потенциалу, как это показано на фиг. 2 стрелкой.



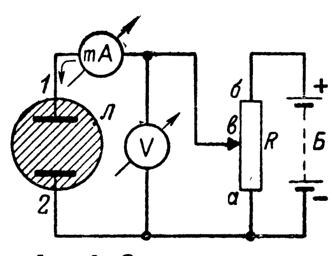
Фиг. 2. Разряд конденсатора на проводимость.

Что же представляют собой проводимости и каково их значение? Ведь разновидности электрических разрядов определяются именно свойствами проводимостей и поэтому нам весьма существенно определить их характер.

В качестве проводимостей наиболее широко применяются металлические проводники. Характерной чертой этих проводимостей является способность устойчиво сохранять свои электрические свойства при протекании по ним электрического тока. Хотя эти материалы в некоторой степени изменяют величину своей проводимости под действием тока (проводимость их ухудшается с повышением температуры), но эти изменения несущественны, ибо качество проводимости не изменяется коренным образом. Сами изменения происходят сравнительно медленно, с большой инерцией.

Оказывается, что в качестве проводимости могут быть использованы и газы. Но при этом наблюдаются настолько интересные и значительные явления, что каждое из них требует самостоятельного описания и изучения и каждое из них имеет на практике совершенно самостоятельное приложение.

Раньше других был осуществлен электрический разряд мощной электрической батареи через небольшой воздушный промежуток. Это — так называемая электрическая дуга, открытая В. В. Петровым в 1802 г. Другим типом электрического разряда через воздушный промежуток является искровой разряд, развивающийся при значительной разности потенциалов между двумя электродами маломощного источника. Особое место занимают газонаполненные приборы, которые обычно называются газоразрядными и которые правильнее было бы называть приборами с электрическим разрядом через разреженный газ.



Фиг. 3. Схема включения газоразрядной лампы.

В отличие от широко распространенных в электротехнике проводимостей проводимость разреженного газа при некоторых условиях резко меняется. Скорость изменения проводимости разреженных газов может быть настолько велика, что на практике очень часто это изменение можно считать мгновенным.

Какие же физические процессы происходят в газонаполненных приборах при прохождении через них электрического тока? Какие условия следует создавать для развития этих физических процессов?

Представим себе стеклянный баллон с двумя металлическими (или угольными) электродами, из которого выкачан воздух до разрежения 0,000001 *мм* рт. ст. (такое разрежение, например, у электронных ламп). В баллон после откачки из него воздуха ввели небольшое количество газа (аргон, неон, водород и др.). В практических случаях баллоны наполняются до плотности газа порядка 0,001 ÷ 100 *мм* рт. ст. Это и будет элементарный газоразрядный прибор.

Если к электродам *1* и *2* прибора *Л* присоединить источник тока, заряженный конденсатор или батарею, как это и показано на фиг. 3, то будут возможны различные физические процессы.

Для источника (батареи) *Б* газоразрядный прибор *Л* и соединительные провода будут внешней цепью, и если прибор обладает электрической проводимостью, то через него

должен проходить ток в направлении, показанном стрелкой на фиг. 3. Оказывается, что газовый промежуток между электродами прибора при некоторой разности потенциалов между ними, т. е. при некотором необходимом напряжении батареи, может резко изменить свои свойства и превратиться в хорошую проводимость. Величина этой разности потенциалов (напряжения батареи) существенно зависит от степени разрежения газа между электродами и от расстояния между ними.

Явление превращения газоразрядного прибора из непроводящего в хорошую проводимость связано с зажиганием разряда в приборе. Напряжение, при котором происходит зажигание, носит название **потенциал зажигания** $U_з$. Такое название не столько отражает существо прохождения электрического разряда через газ, сколько внешний световой эффект, которым сопровождается возникновение разряда. Действительно, газовый промежуток, становясь проводящим (разряд происходит), ярко освещается характерным для данного газа цветом. Прибор вспыхивает, зажигается.

Физический процесс, который наблюдается в приборе с разреженным газом между холодными электродами, носит название **холодного электрического разряда**. В чем же существо происходящего в приборе процесса?

Как известно, всякий газ представляет собой совокупность движущихся молекул, число которых в 1 $см^3$ определяет плотность газа. Удары молекул о стенки сосуда, в который газ заключен, создают давление газа на стенки. Величина давления газа в сосуде определяется как числом молекул в единице его объема, так и скоростями их движения.

Электрически молекулы газа нейтральны, так как положительный заряд ядра любого из атомов молекулы уравновешивается отрицательным зарядом электронов, движущихся по орбитам вокруг ядра. Однако при некоторых условиях молекулы газа могут быть превращены в положительные или отрицательные ионы. Если с орбиты атома (обычно внешней) будет выбит один или несколько электронов, то атом превратится в положительный ион. Если атом приобретет дополнительный электрон на одну из устойчивых орбит, то он превратится в отрицательный ион. Свободно движущиеся электроны, небольшое количество кото-

рых постоянно образуется в газе космическими лучами, обладая достаточной энергией, могут при соударениях с молекулами выбить с их внешних орбит электроны и превратить эти молекулы (атомы) в ионы. Благодаря этому в общей массе атомов газа, заключенных в баллоне, увеличивается и число свободно движущихся электронов.

На фиг. 3 была представлена схема включения газоразрядного прибора, напряжение на электродах которого можно плавно менять. Проследим за тем, что будет происходить в приборе при перемещении движка потенциометра *К* от точки *а* к точке *б*.

Внутри баллона, а следовательно, и между электродами прибора находится разреженный газ. Молекулы газа находятся в движении, свободные электроны перемещаются в случайных направлениях. При перемещении движка потенциометра вверх от точки *а* мы создаем разность электрических потенциалов между электродами *1* и *2*, следовательно, создаем между ними электрическое поле, способное производить работу по перемещению электрических зарядов. Поскольку находящиеся в поле электрические заряды — электроны — обладают отрицательным зарядом, они будут двигаться к электроду *1*, как положительно заряженному. Скорость, а следовательно, и энергия электронов, движущихся под действием поля, возрастают по мере увеличения напряжения между электродами. Электрон, получивший под действием поля направленное движение, встречает на своем пути молекулу газа, ударяется о нее и несколько меняет свое направление, вновь встречает молекулу газа, вновь ударяется и опять несколько изменяет направление движения в зависимости от угла, под которым был произведен удар, и энергии электрона. Однако общая направленность к положительному электроду у него сохраняется. Чем слабее поле воздействует на электрон, т. е. чем меньше напряженность этого поля и чем больше встречается на его пути молекул газа, тем труднее перемещаться электрону между электродами.

Если теперь мы будем плавно перемещать далее движок потенциометра и тем самым увеличивать разность потенциалов между электродами прибора, то наконец (точка *в* на схеме), при некоторой разности потенциалов напряженность поля станет настолько велика, что электроны при встрече с молекулами газа будут способны выбивать с орбит атомов электроны и превращать атомы в ионы. Выби-

тые из атомов электроны тоже будут разгоняться полем, а следовательно, сами будут выбивать электроны из встречающихся на их пути атомов. Процесс этот быстро нарастает, газовый промежуток между электродами практически мгновенно становится хорошо проводящим. Но сказанное еще не полностью определяет холодный или тлеющий разряд, а только объясняет процесс вспышки разряда в приборе. Оказывается, что для поддержания длительного холодного разряда в приборе должны быть созданы дополнительные условия.

Действительно, образование электронов и ионов при соударениях первичных электронов с атомами газа, т. е. ионизация газа, приводит к тому, что в пространстве между электродами прибора оказывается большое количество отрицательных и положительных электрических зарядов — электронов и ионов.

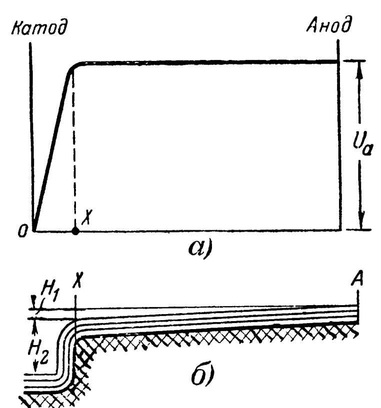
Заряды электрона и иона равны, только противоположны по знаку (атом, потеряв электрон, делается положительным). Однако масса иона в тысячи раз больше массы электрона. Поэтому электрическое поле, естественно, заставляет двигаться более легкие электроны со значительно большими скоростями, чем более тяжелые ионы. При этом электроны движутся к электроду *1* (аноду), а ионы медленно перемещаются в направлении к электроду *2* (катоду).

Для поддержания токопрохождения через прибор в направлении от катода к аноду должны посылаться все новые и новые электроны, и скорость их образования должна быть равна скорости поглощения электронов анодом. С другой стороны, в приборе не должно быть постоянного накапливания положительно заряженных атомов (ионов). Скорость их образования должна быть уравновешена скоростью рекомбинации, т. е. превращения их в нейтральные атомы на катоде.

Одним из видов электрического разряда в газе, который самостоятельно себя поддерживает (самостоятельный разряд), является тлеющий или холодный разряд. Поддерживается такой разряд следующим образом.

В пространстве между электродами, и особенно у катода, скапливается большое количество положительных ионов, создающих в этом пространстве значительный объемный положительный заряд, имеющий определенную толщину и плотность, величина которого примерно равна заряду ано-

да, т. е. разность потенциалов между точкой вблизи катода и анодом ничтожно мала. Разность же потенциалов между точкой вблизи катода и самим катодом значительна и практически равняется напряжению на аноде. Положительно заряженные ионы, находящиеся вблизи от катода на расстоянии OX (фиг. 4,*а*), испытывают сильное притягивающее действие отрицательного заряда катода и, быстро разгоняясь, сильно ударяют по катоду. Металл катода под действием ударов ионов испускает свободные электроны, которые направляются к аноду, ионизируя на своем пути встречные молекулы газа. Место ушедших ионов из точки X занимают соседние ионы. Попав в точку X, они быстро устремляются к катоду, а их место снова занимают соседние ионы, и т. д.



Фиг. 4. Распределение потенциала электрического поля в разрядном промежутке при тлеющем (холодном) разряде (*а*) и его приблизительная аналогия (*б*).

Описанный процесс до некоторой степени имеет сходство с процессом перемещения воды в реке, имеющей очень незначительный наклон русла, а затем резкое изменение высоты (фиг. 4,*б*). Частицы воды медленно перемещаются к точке X (разность высот H_1 точек A и X мала), затем стремительно срываются с обрыва, разгоняются на значительной разности высот H_2 и ударяют о дно обрыва, производя значительную механическую работу, пропорциональную потенциальной энергии частиц.

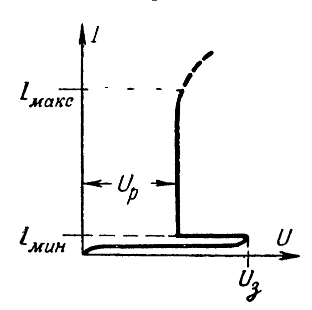
Ионы при соприкосновении с металлом восстанавливают потерянный электрон и превращаются в нейтральный атом или молекулу. Таким образом, накопления положительных зарядов не происходит и разряд длительно поддерживается за счет электронов, выбиваемых из катода ионами.

Следующее, весьма существенное замечание окончательно определяет физическое явление, называемое холодным (тлеющим) разрядом. Оказывается, что описанный самостоятельный разряд в приборе протекает не при том напряжении (потенциале), при котором прибор зажигается,

а при меньшем. Проводимость прибора в момент зажигания и в условиях нормально протекающего разряда существенно различна, и переход из одного состояния в другое, от одной проводимости к другой, происходит практически мгновенно, как это показано на фиг. 5.

Напряжение U_p, при котором происходит нормальный холодный разряд, т. е. падение напряжения на проводимости газоразрядного прибора, носит название **нормального катодного падения**.

Характерным, замечательным свойством газоразрядного прибора является способность его пропускать при тлеющем разряде ток различной величины без изменения величины падения напряжения на приборе.



Фиг. 5. Вольтамперная характеристика лампы при зажигании разряда и при тлеющем разряде.

Для обеспечения нормального режима работы лампы с холодным катодом, т. е. снижения потенциала анода от величины $U_з$ в момент зажигания до величины U_p после зажигания, лампу с холодным катодом следует включать в схему с дополнительным сопротивлением. Действительно, допустим, что лампа зажигается при напряжении $U_з = 80$ *в*, а нормальное падение напряжения на ней при разряде $U_p = 50$ *в*. Тогда после зажигания избыточное напряжение окажется равным $U_з - U_p = 80 - 50 = 30$ *в*.

Пусть максимально допустимый ток данной лампы $I_{макс} = 40$ *ма*. Какое же нужно включить дополнительное сопротивление $R_д$, чтобы обеспечить нормальный процесс в лампе? Поскольку на дополнительном сопротивлении должно быть падение напряжения 30 *в* при токе не более 40 *ма*, то $R_д \geqslant 30/0{,}04 = 750$ *ом*.

Почему же нельзя через прибор пропустить ток меньше чем $I_{мин}$ и больше чем $I_{макс}$ (эти данные указываются в паспорте лампы)?

Оказывается, что если ток будет меньше чем $I_{мин}$, то образование ионов в приборе будет недостаточным, образование электронов под воздействием ударов ионов о катод будет неустойчивым и прибор будет работать ненор-

мально. При значительном уменьшении тока прибор гаснет.

Если ток через прибор увеличивается в пределах от $I_{мин}$ до $I_{макс}$, то это не влечет за собой увеличения падения напряжения на приборе потому, что интенсивность ударов ионов по катоду, соответствующая плотности тока ионов на катоде, не увеличивается, так как не увеличиваются толщина и плотность объемного заряда ионов, а только увеличиваются длина и ширина области объемного заряда ионов, взятые в направлениях, параллельных поверхности катода, полное число ионов, ударяющих о катод, и соответственно площадь катода, излучающая электроны.

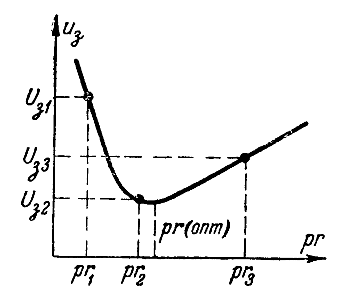
Если ток через прибор возрос настолько, что удары ионов распределяются уже на всю площадь катода (положительный объемный заряд ионов охватывает весь катод), то дальнейшее увеличение электронной эмиссии с катода возможно только за счет увеличения интенсивности ударов ионов. Увеличение же интенсивности ударов ионов требует большей разности потенциалов на электродах прибора, т. е. более сильного поля. Следовательно, увеличение тока через прибор сверх $I_{макс}$ повышает падение напряжения на приборе. Такой режим для прибора опасен и может привести его к гибели. Так, повышение интенсивности ударов ионов по катоду приводит к разогреванию его, а разогретый он сам способен испускать электроны за счет тепловой эмиссии. При этом количество электронов резко возрастет, резко возрастет и ионизация, а следовательно, и бомбардировка катода ионами. Процесс нарастания тока в приборе будет происходить лавинообразно, и холодный разряд перейдет в мощный дуговой разряд, опасный для прибора. По этой причине и потому, что полезными, нужными для практики свойствами прибор обладает при нормальном разряде, его и следует использовать при рабочих токах, лежащих в пределах $I_{мин} — I_{макс}$.

Промышленные образцы ламп с холодным катодом имеют различные потенциалы зажигания и различные величины нормального катодного падения. Выясним причины этих различий.

Как уже было указано ранее, напряжение зажигания прибора зависит от давления газа в приборе и от расстояния между электродами. Действительно, если давление газа в приборе значительное, то электрон, двигающийся от катода к аноду, будет на своем пути так часто встречать

молекулы газа, что от одного соударения до следующего он не сможет приобрести достаточной скорости и энергии и ионизации газа не будет. Если же степень разрежения очень велика или расстояние между электродами очень мало, то вероятность столкновения электрона с молекулой газа уменьшается и интенсивность ионизации мала. В том и другом случае необходимо повышать напряжение, чтобы за счет увеличения энергии электронов добиться увеличения ионизации.

Таким образом, потенциал зажигания разряда в приборе зависит от произведения плотности газа на расстояние между электродами. Эта зависимость представлена на фиг. 6. Здесь p — давление газа в *мм* рт. ст. и r — расстояние между электродами. Из фиг. 6 следует, что при оптимальном подборе произведения pr можно получить минимальный потенциал зажигания. Естественно, что в практических случаях (за исключением специальных, которые будут рассмотрены ниже) следует стремиться создавать приборы с малым $U_з$.



Фиг. 6. Зависимость $U_з$ — потенциала зажигания разряда в лампе от pr — произведения плотности газа на расстояние между электродами лампы.

Рассмотрим теперь, чем определяется величина нормального катодного падения напряжения приборов с холодным разрядом. Как мы выяснили ранее, процесс самостоятельного разряда в приборе заключается в ионизации молекул газа электронами и создании электронов при ударах ионов о поверхность катода. Оказывается, что для того, чтобы ионизировать молекулу одного газа, электрон должен обладать одной энергией, а чтобы ионизировать молекулу другого газа, его энергия должна быть другой. Следовательно, для того чтобы электрон, двигающийся в газе, мог его ионизировать, он должен быть разогнан в одном газе до большой скорости, чем в другом.

Скорость электрона в электрическом поле может быть выражена следующим образом:

$$v = 600\sqrt{U},$$

где v — скорость электрона, *км/сек*;

U — пройденная электроном разность потенциалов, *в*.

Поэтому ионизационные свойства газов принято определять потенциалом ионизации, понимая под этим наименьшую энергию электрона, выраженную в вольтах, при которой он способен ионизировать молекулу данного газа. Потенциал ионизации у паров ртути — 10,39 *в*, у аргона — 15,69 *в*, у неона — 21,47 *в*, у гелия — 24,5 *в* и т. д.

Известно также, что в одном металле работа, которую должен совершить электрон, чтобы отделиться от металла, должна быть больше, а у другого металла меньше. Дополнительная энергия электрону может быть сообщена различными способами. В лампах с горячим катодом (радиолампах) она сообщается от постороннего источника, подогревающего катод (так называемая термоэлектронная эмиссия). В лампах с холодным катодом эта дополнительная энергия сообщается катоду ударами ионов. Работу, которую совершает электрон при выходе из металла, называют работой выхода и ее тоже условно выражают в вольтах.

Все металлы имеют различную работу выхода. Так, у металлов, применяющихся относительно часто, работа выхода имеет следующие значения: цезий — 1,81 *в*; калий — 2 *в*; барий — 2,52 *в*; магний—3,6 *в*; торий — 3,4 *в*; уголь—4,34 *в*; ртуть — 4,52 *в*; алюминий — 4,1 *в*; вольфрам — 4,63 *в*; сталь — 4,77 *в*; никель — 5,03 *в*.

Таким образом, нормальное катодное падение напряжения прибора определяется металлом катода и газом или, как говорят, определяется парой: металл — газ.

Почему же прибор «зажигается»? Чем объясняется свечение лампы? Почему лампы, наполненные различными газами, светятся разным цветом?

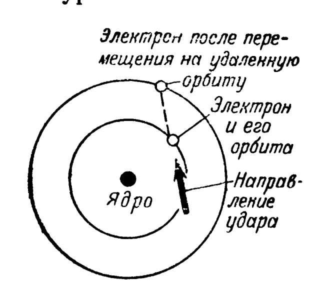
Физическое явление свечения ламп можно кратко описать следующим образом.

Атомы газа, подвергнутые ударам электронов, могут быть не только ионизированы, но также и возбуждены. Объясним это физическое явление.

Представим себе, что свободный электрон ударил по электрону атома, который до этого совершал нормальное движение вокруг ядра. Далее, предположим, что этот удар не обладал силой, достаточной для удаления электрона из сферы действия ядра, т. е. достаточной для ионизации атома. Следовательно, ионизации не произойдет. Однако электрон, получивший удар, все же получит энергию.

Все электроны, вращающиеся вокруг ядра по самостоятельным орбитам, обладают различной энергией. Более того, известно, что чем больше радиус вращения электрона (радиус орбиты), тем большей энергией обладает электрон. Отсюда следует, что электрон, получивший дополнительную энергию удара, должен вращаться по орбите с бóльшим радиусом, как это показано на фиг. 7.

И действительно, внешний удар перемещает электрон на более удаленную орбиту. Но такое состояние атома ненормальное. Вся система атома будет находиться в возмущенном состоянии и будет стремиться уравновесить силы взаимодействия внутри атома. В таком возмущенном или возбужденном состоянии атом находится очень малое время (порядка 0,00000001 сек.). Затем электрон возвращается на прежнюю орбиту, а запасенная им энергия выделяется в виде световой энергии, определенной длины волны (совокупность излучений различных длин волн, характерных для данного газа, и определяет цвет его свечения).



Фиг. 7. Возбуждение атома электронным ударом.

Оказывается, что атомы каждого из газов могут быть возбуждены электронами, обладающими вполне определенной энергией. Эта энергия условно выражается в вольтах и носит название потенциал возбуждения, подобно энергии ионизации, определяемой потенциалом ионизации.

Значения потенциалов возбуждения для некоторых газов таковы: пары ртути — 4,86 *в*; аргон — 12 *в*; неон — 16,6 *в*; гелий — 20,5 *в*.

Электроны, двигающиеся в газе под действием электрического поля, проходят от удара до удара различные пути, так как распределение молекул газа в пространстве между электродами лампы носит случайный характер и постоянно изменяется. Поскольку пути электронов различны, а совершают они под действием постоянной силы поля равноускоренное движение, энергия их при ударе различна и результаты их ударов по атомам тоже различны. Электроны с наибольшей энергией ионизируют атомы газа, обладающие меньшей, но все же достаточной энергией (соответ-

ствующей потенциалу возбуждения), возбуждают атомы газа. Электроны, энергия которых меньше энергии, соответствующей потенциалу возбуждения газа, упруго соударяются с атомами и молекулами газа.

Поскольку в общей массе электронов, ионизирующих газ, всегда находится большое количество электронов, способных только возбудить атомы, прибор с холодным разрядом при «зажигании» всегда светится.

СВОЙСТВА ЛАМП С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Лампа с холодным катодом обладает следующими замечательными свойствами:

1. В отличие от других известных в технике проводимостей (сопротивлений) лампа с холодным катодом способна поддерживать на своих выходных зажимах постоянное напряжение при изменении протекающего через нее электрического тока (при изменении тока от $I_{мин}$ до $I_{макс}$).

2. Лампа с холодным катодом, выполненная с электродами различной площади или различных свойств, может быть использована в качестве выпрямителя переменного тока.

3. Лампы с холодным катодом, наполненные различными газами, способны светиться ярким характерным для каждого газа цветом.

Особый интерес представляет техническое использование лампы с холодным катодом для стабилизации напряжения.

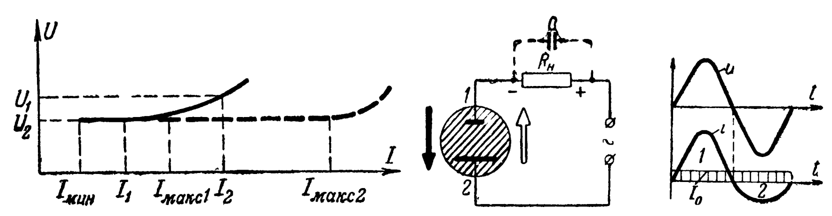
В зависимости от назначения прибора конструкция его может быть различна. Так, если прибор служит для стабилизации напряжения, то размеры его электродов должны быть равны или близки по размерам. В этом случае любой из электродов может быть использован в качестве анода или катода. Если прибор служит для преобразования электрической энергии в световую (неоновая лампа), то он может быть выполнен с катодом большой площади и анодом малой площади.

Наконец, если прибор предназначен для выпрямления переменного тока, то электроды его обязательно должны быть различны по площади. Работа его должна происходить в условиях, когда ток проходит в одном направлении при нормальном падении напряжения на приборе, а в обратном направлении — при большем, чем нормальное, т. е. прибор должен менять величину своего внутреннего сопро-

тивления току различных направлений. Рассмотрим работу прибора с холодным катодом при использовании его в качестве выпрямителя.

Как известно, нормальный режим работы прибора определяется тем, что увеличение тока от $I_{мин}$ до $I_{макс}$ происходит за счет увеличения рабочей площади катода. Если действительная площадь катода вся превращена в рабочую (вся поверхность катода испускает электроны под воздействием ударов ионов), то дальнейшее увеличение тока через прибор возможно только за счет усиления поля между электродами, т. е. за счет увеличения падения напряжения на приборе.

Из фиг. 8 видно, что если через прибор протекает ток I_2 и $I_{макс1} < I_2 < I_{макс2}$, где $I_{макс1}$ — максимальный ток через прибор при использовании электрода *1* в качестве катода,



Фиг. 8. Вольтамперная характеристика нормального и аномального тлеющего разряда.

Фиг. 9. Принципиальная схема выпрямления тока лампой тлеющего разряда и графики приложенного к схеме напряжения u и протекающего через лампу и нагрузку $R_н$ тока i.

а $I_{макс2}$ — максимальный ток через прибор при использовании в качестве катода электрода *2*, то для переменного тока лампа окажется таким сопротивлением, которое меняет свою величину в зависимости от направления тока. Всякий же элемент, оказывающий различные сопротивления токам различных направлений, является выпрямительным элементом.

На фиг. 9 показаны схема выпрямления с газоразрядным элементом и график выпрямленного тока. При прохождении переменного тока через такой элемент на сопротивлении нагрузки $R_н$, включенном последовательно с прибором, выделяется постоянная составляющая тока (постоянный ток I_0). В отличие от широко распространенных кенотронных выпрямителей прибор с холодным разрядом пропускает ток в том и другом направлении. Однако, когда ток течет

в направлении, показанном черной стрелкой, прибор имеет несколько меньшее внутреннее сопротивление, чем тогда, когда ток течет по направлению светлой стрелки. Следовательно, ток в первую полуволну переменного напряжения на аноде достигает большего значения, чем во вторую полуволну.

Если параллельно сопротивлению нагрузки $R_н$ включить сглаживающий конденсатор C, то можно получить на выходе схемы обычный для выпрямителей эффект выпрямления. На практике подобного вида выпрямители не нашли широкого применения из-за относительно низкого к. п. д.

СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Использование газоразрядного прибора с тлеющим разрядом в качестве стабилизатора напряжения имеет существенное значение для современных радиотехнических схем вообще и измерительных схем в частности. Стабилизация напряжения с помощью ламп с холодным катодом все шире и шире применяется в производственных образцах аппаратуры и в радиолюбительских схемах. Для этой цели используются как специальные стабилизаторы напряжения, так и неоновые лампы, изготовляемые промышленностью для модуляции света или индикации.

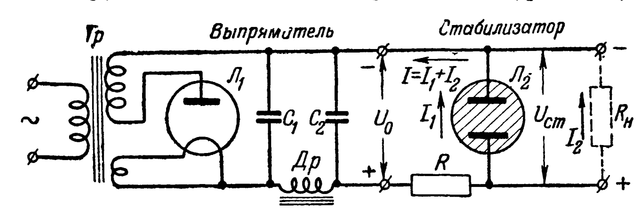
Что же такое газоразрядный стабилизатор?

Выше нами были описаны физические свойства приборов с тлеющим разрядом. Кратко эти свойства могут быть сформулированы следующим образом: прибор с двумя электродами, наполненный газом, чаще инертным, будучи включен в цепь источника тока последовательно с дополнительным (балластным) сопротивлением, способен пропускать изменяющийся по величине в определенных пределах ток и создавать при этом на своих зажимах практически постоянное напряжение.

Пусть нами построена радиотехническая схема, которая должна питаться от источника постоянного тока, в качестве которого используется выпрямитель. Как известно, выпрямитель переменного тока обладает тем недостатком, что на выходе его напряжение получается не постоянным, а пульсирующим. Для устранения этого недостатка используются сглаживающие фильтры, состоящие из конденсаторов (емкостью в 10—20 *мкф*) и дросселей (индуктивностью в 10—20 *гн*). Нагрузкой такого выпрямителя обычно бывает потенциометр, с которого и снимается нужное напряжение.

Неудобство такой системы питания заключается в том, что напряжение на потенциометре и на его участках изменяется при изменении выпрямляемого переменного напряжения и при подключении к потенциометру или отключении от него других, всегда возможных, нагрузочных сопротивлений. Сглаживающий же фильтр выпрямителя практически не реагирует на изменения напряжения, происходящие с частотой в несколько периодов в секунду или еще более медленные. Однако такие медленные, но значительные по величине изменения напряжения в практических случаях почти всегда происходят (например, колебания напряжения городской сети).

Допустим, что мы включили лампу с холодным катодом стабилизатор) $Л_2$ на выход выпрямителя (фиг. 10).



Фиг. 10. Принципиальная схема кенотронного выпрямителя с фильтром, напряжение которого стабилизируется лампой тлеющего разряда.

При включении выпрямителя в электросеть на выходе фильтра получим постоянное сглаженное напряжение U_0. Если это напряжение будет больше, чем потенциал зажигания лампы $Л_2$, то она „загорится", т. е. в ней возникнет тлеющий разряд. Лампа $Л_2$ станет проводящей и через нее потечет ток I_1.

С момента зажигания разряда на зажимах лампы $Л_2$ установится нормальное падение напряжения U_{cm} (величина его зависит от выбранной пары: металл — газ), меньшее, чем напряжение зажигания разряда. По сопротивлению R будет проходить ток, который создаст на нем падение напряжения $I_1 R = U_0 - U_{cm}$, равное разности напряжений до стабилизатора и после стабилизатора.

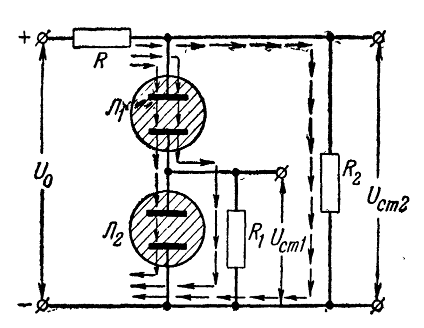
Это выражение может быть использовано для определения тока I_1, протекающего через известное сопротивление R:

$$I_1 = \frac{U_0 - U_{cm}}{R}$$

и для определения сопротивления R, если известен максимально допустимый ток $I_{макс}$ через прибор, стабилизуемое напряжение U_0 и стабилизованное напряжение $U_{ст}$ (отметим, что $U_{ст}$ и $I_{макс}$ — параметры лампы):

$$R=\frac{U_0-U_{ст}}{I_{макс}}.$$

Что же произойдет, если к выходным зажимам стабилизатора присоединить сопротивление нагрузки $R_н$? Тогда ток I будет проходить через лампу $Л_2$ и через сопротивление нагрузки $R_н$. При изменении нагрузки будет меняться и ток I_2, проходящий через нагрузку, и ток I_1 через лампу. Если сопротивление $R_н$ постепенно уменьшать, то ток через него будет увеличиваться, а ток через лампу может оказаться настолько малым, что разряд в ней прекратится. Лампа „погаснет" и выключится.



Фиг. 11. Схема стабилизатора напряжения с двумя последовательно соединенными лампами.

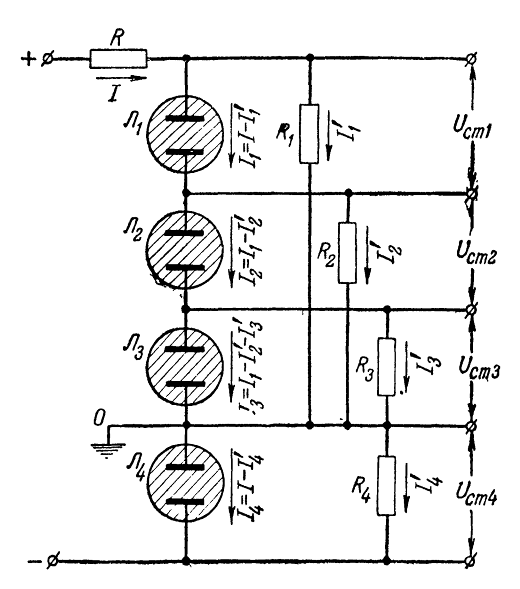
Пока ток через лампу $Л_2$ меняется в пределах от $I_{макс}$ до $I_{мин}$, лампа работает и стабилизация напряжения осуществляется. Если ток станет меньше $I_{мин}$, лампа выключится, а если он станет больше $I_{макс}$, то стабилизация резко ухудшится, так как в режиме аномального тлеющего разряда напряжение на зажимах лампы не остается постоянным при изменении тока, а меняется.

Лампы с холодным катодом, выпускаемые промышленностью, имеют различные параметры ($U_з$, $U_{ст}$, $I_{макс}$, $I_{мин}$), однако на практике может часто потребоваться большее стабилизованное напряжение или больший ток, чем дает одна лампа. Как поступить в этом случае?

Если требуется стабилизованное напряжение большее, чем можно получить от одной лампы, то следует две или несколько ламп соединить последовательно, как это показано на фиг. 11.

При последовательном соединении двух или нескольких стабилизаторов можно получить соответственно два или несколько стабилизованных напряжения. При этом следует так подбирать нагрузки, чтобы отводимые в них токи не были слишком велики, а ток, протекающий через вторую лампу $Л_2$, не был слишком мал (т. е. меньше $I_{мин}$), так как иначе она не будет работать.

Если необходимо составлять последовательную цепочку стабилизаторов напряжения, то целесообразно подбирать их так, чтобы лампа с бо́льшим допустимым рабочим током



Фиг. 12. Соединение стабилизаторов напряжения в последовательную цепочку.

ставилась в последовательной цепочке там, где должен протекать больший ток. На фиг. 12 составлена примерная последовательная цепочка стабилизаторов с комбинированно включенными нагрузками.

Если, например, суммарный ток $I = 80$ *ма*, а токи нагрузок $I'_1 = 40$ *ма*, $I'_2 = 10$ *ма*, $I'_3 = 20$ *ма* и $I'_4 = 3$ *ма*, то через лампу $Л_1$ будет проходить ток $I_1 = I - I'_1 = 80 - 40 = 40$ *ма*, через лампу $Л_2$ — ток $I_2 = I_1 - I'_2 = 40 - 10 = 30$ *ма*,

через $Л_3$ — ток $I_3 = I_1 - I'_2 - I'_3 = 40 - 10 - 20 = 10$ *ма* и через $Л_4$ — ток $I_4 = I - I'_4 = 80 - 3 = 77$ *ма*.

Здесь

$$I'_1 = \frac{U_{cm1} + U_{cm2} + U_{cm3}}{R_1},$$

$$I'_2 = \frac{U_{cm2} + U_{cm3}}{R_2},$$

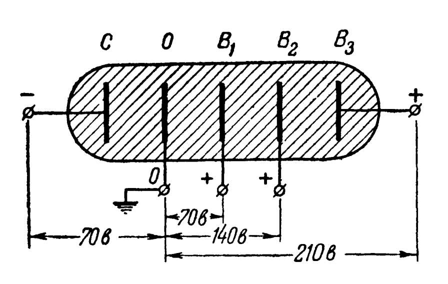
$$I'_3 = \frac{U_{cm3}}{R_3},$$

$$I'_4 = \frac{U_{cm4}}{R_4}.$$

Ток, протекающий через каждую лампу, должен быть больше минимально допустимого для данной лампы.

Как следует из примера, лампа $Л_4$ цепочки должна иметь наибольший допустимый разрядный ток.

Для некоторых схем выпускаются специальные стабиливольты, состоящие из четырех последовательных газовых промежутков, совмещенных в одном баллоне (фиг. 13). Принципиально такой прибор аналогичен цепочке, показанной на фиг. 12. В нем электроды расположены так, что каждый из них, исключая крайние, является анодом для одного газового промежутка и катодом для другого. Так, электрод *О* является анодом в паре *С—О* и катодом в паре $О - Б_1$. Размеры электродов различны. В схему они включаются так, что через электроды бо́льших размеров протекает больший ток. Электроды из мягкой стали выполнены в виде колпачков разных диаметров. Колпачки вставлены один в другой. Промежутки между электродами заполнены неоном при давлении $p = 20—60$ *мм* рт. ст. Для снижения напряжения на электродах лампы металлическая поверхность электрода покрывается пленкой щелочно-земельного металла бария. В этом случае нормальное катодное падение

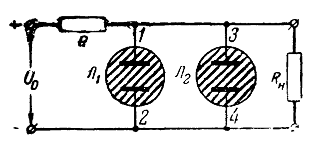


Фиг. 13. Схема стабиливольта — делителя напряжения.

потенциала составляет 70 *в*, а общее напряжение на приборе приблизительно равно $4 \times 70 = 280$ *в*.

Стабилизаторы типа, изображенного на фиг. 13, предназначены для питания схем, собранных на приемно-усилительных лампах. Анодное напряжение снимается с электродов $B_3 - O$, напряжение для экранных сеток — с электродов $B_2 - O$ или $B_1 - O$ и напряжение смещения — с электродов $O - C$. Электрод O обычно заземляется и напряжение на участке $O—C$ имеет отрицательное значение.

Из рассмотренного следует, что последовательное соединение газоразрядных приборов с тлеющим разрядом вполне возможно и целесообразно.



Фиг. 14. Схема, показывающая невозможность параллельного зажигания разряда в лампах.

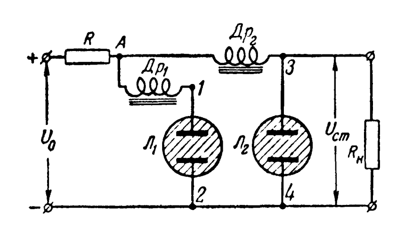
В ряде случаев лампа, стабилизирующая напряжение, не удовлетворяет требованиям схемы потому, что изменение величины тока, потребляемого от стабилизированного источника, выходит за пределы разности $I_{макс} - I_{мин}$. При отключении нагрузки (режим холостого хода стабилизатора) весь ток пройдет через лампу и может оказаться недопустимым для нее.

Величина максимально допустимого тока через лампу, как было выяснено раньше, зависит от площади электродов. Увеличение площади электродов путем параллельного подключения к лампе второй лампы кажется естественным, но в действительности не решает вопроса.

Дело в том, что все лампы с холодным разрядом, имеющие одинаковые паспортные данные, имеют все же различные потенциалы зажигания $U_з$. Больше того, одна и та же лампа при изменении условий (изменение температуры, действие внешних полей, износ и т. д.) „зажигается" при различных напряжениях. Эта разница в напряжениях (при которых происходит зажигание лампы) составляет величину от долей до единиц вольта.

Представим себе, что в схеме стабилизатора две лампы включены параллельно (фиг. 14). Одна из них $Л_1$ имеет напряжение зажигания $U_з$, а другая $Л_2 - U_з + \Delta U_з$. При включении стабилизатора напряжение в точках *1* и *2* будет очень быстро нарастать и, как только оно достигнет значения $U_з$, лампа $Л_1$ „загорится" и напряжение на ней упа-

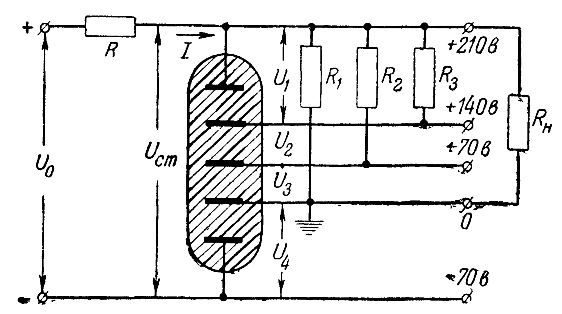
дет до величины нормального катодного падения потенциала $U_{ст}$. Поскольку лампа $Л_2$ присоединена непосредственно к точкам *1* и *2* лампы $Л_1$, то на ее электродах тоже будет напряжение $U_{ст}$, стабилизованное первым прибором. Следовательно, в точках *3* и *4* не может быть напряжения $U_з + \Delta U_з$, при котором „загорается" вторая лампа, а это значит, что лампа $Л_2$, подключенная к $Л_1$, работать не будет.



Фиг. 15. Схема параллельного включения ламп тлеющего разряда с дросселями.

Если устройство, которое нужно питать от стабилизованного источника, имеет несколько раздельных цепей питания, что практически встречается, например, в ламповых схемах, то эти цепи следует разделить на группы и присоединять их к источнику питания через собственные стабилизаторы.

Можно рекомендовать параллельное включение газоразрядных ламп с дросселями в анодной цепи (фиг. 15). Значение дросселей здесь сводится к тому, что при зажигании лампы $Л_1$ (лампа становится проводящей) на зажимах дрос-



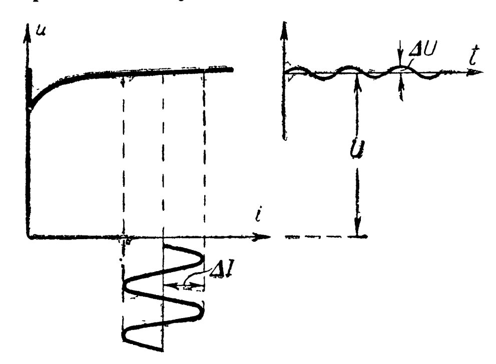
Фиг. 16. Схема стабилизатора напряжения со стабиливольтом.

селя $Др_1$ создается напряжение, повышающее потенциал точки *A*, относительно точки *1*. Если общая разность потенциалов точек *A* и *2* будет достигать величины $U_з + \Delta U_з$, то „загорится" и вторая лампа $Л_2$. Важно здесь, чтобы в лампах начался холодный разряд, после чего они будут рабо-

тать совершенно устойчиво. Подобный способ включения возможен только при относительно мощных лампах или значительных индуктивностях дросселей $Др_1$ и $Др_2$.

Для лучшего выяснения работы стабилизатора рассмотрим реальную схему стабилизации (фиг. 16), построенную на стабиливольте. Стабилизатор включен параллельно нагрузке $R_н$. При этом возможно снимать с него четыре разных напряжения (—70, +70, +140 и +210 *в*).

До сих пор мы считали, что изменение величин подключаемых и отключаемых нагрузок, а также изменение входного напряжения U_0 не сказывается на величине ста-



Фиг. 17. Графики, поясняющие процесс стабилизации напряжения лампой тлеющего разряда. Верхний правый рисунок сознательно искажен; в действительности изменения напряжения меньше по сравнению с его основным значением.

билизованного лампой напряжения. Для многих случаев практики это заключение может быть признано справедливым. Однако в действительности величина стабилизованного напряжения несколько меняется при изменении входного напряжения и изменения сопротивлений, подключаемых параллельно газовым промежуткам.

На фиг. 17 показана вольтамперная характеристика стабиливольта. Из нее видно, что изменение тока через стабиливольт влечет за собой изменение напряжения на его зажимах. Так, если величина протекающего через лампу тока I колеблется от $I+\Delta I$ до $I-\Delta I$, то это вызывает колебание напряжения U на зажимах лампы от $U+\Delta U$ до $U-\Delta U$ (рисунок фиг. 17 сознательно искажен; в действи-

тельности изменения напряжения значительно меньше по сравнению с основным значением).

Отношение $\Delta U/\Delta I = W$ имеет размерность сопротивления и потому носит название сопротивления газового промежутка переменному току. Величина W для современных ламп с тлеющим разрядом при стабилизации напряжений, пульсирующих с частотой 1—2 *гц* (при медленных колебаниях), имеет порядок 10—200 *ом*. Для напряжений, пульсирующих с большей частотой, величина W растет. Для уменьшения сопротивления газового промежутка при значительной частоте пульсации следует параллельно ему присоединить конденсатор емкостью 2—4 *мкф*.

Существенно здесь именно то, что лампа с холодным разрядом хорошо реагирует на медленные пульсации. Пульсации значительной частоты практически легко сгладить и фильтром. Однако медленные пульсации напряжения сгладить фильтром практически невозможно. Для того чтобы не получить пульсирующего напряжения на газовом промежутке, его сопротивление переменному току должно быть весьма мало.

Отсюда очевидны преимущества ламп с холодным катодом.

Определим значения элементов схемы стабилизатора фиг. 16.

Как будет видно дальше, стабилизация напряжения тем лучше, чем больше величина сопротивления R. Однако очень большой величину R принимать не следует, так как это требует значительного повышения напряжения на входе схемы. На практике следует выбирать сопротивление R таким, чтобы падение напряжения на нем было равно половине нормального падения напряжения U_{cm} на самом стабиливольте:

$$IR = \frac{U_{cm}}{2} \quad \text{и} \quad U_0 = IR + U_{cm} = \frac{3}{2} U_{cm},$$

где $U_{cm} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4$ (т. е. сумме напряжений на газовых промежутках стабиливольта).

Величина R определится из выражения:

$$R = \frac{U_0 - U_{cm}}{I},$$

где I — ток, который проходит по стабиливольту в режиме холостого хода. Этот ток не должен превышать $I_{макс}$ (макси-

мально допустимый ток) и не должен быть меньше $I_{мин}$ (минимальный ток).

Для стабиливольта балластное сопротивление R может быть определено, например, по следующим данным. Пусть максимальный ток стабилизатора $I_{макс} = 40$ *ма*, минимальный ток $I_{мин} = 10$ *ма* и $U_{ст} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = 280$ *в*. Тогда стабилизуемое напряжение $U \geqslant \frac{3}{2} \cdot 280 = 420$ *в*, а балластное сопротивление

$$R = \frac{420 - 280}{40 \cdot 10^{-3}} = 3\,500 \text{ ом}.$$

Для безопасной работы прибора следует принять $R = 4\,000$ *ом*.

Определим теперь степень стабилизации напряжения с помощью стабиливольта.

Допустим, что колебания напряжения на входе схемы достигают $p\%$ основного значения. Обозначим приращение напряжения через ΔU_0. Как изменится при этом напряжение на одном газовом промежутке?

Изменение напряжения вызовет изменение тока в цепи $\Delta I = \frac{\Delta U}{R}$ и отсюда изменение напряжения на газовом промежутке будет:

$$\Delta U_1 = \pm W \frac{\Delta U_0}{R}.$$

Перейдем к числовым значениям для случая $p = 10\%$ и $W = 30$ *ом*:

$$\Delta U_0 = 0{,}1 \cdot 420 = 42 \text{ в}$$

и

$$\Delta U_1 = 42 \cdot \frac{30}{4\,000} = 0{,}315 \text{ в},$$

что составляет $\pm 0{,}45\%$ от $U_1 = 70$ *в*.

Отсюда видно, что с увеличением сопротивления R колебание напряжения уменьшается, т. е. качество стабилизации повышается. Незначительно изменяется напряжение и при изменении величины сопротивления, подключаемого параллельно газовому промежутку. При этом колебания напряжения на других промежутках стабиливольта будут совершенно ничтожными.

Сопротивления R_1, R_2 и R_3 на фиг. 16 служат для облегчения зажигания разряда в промежутках стабилизатора.

Если входное напряжение U_0 будет не очень значительно превышать нормальное стабилизованное напряжение U_{cm}, то стабиливольт при включении может не загореться. Как было указано ранее, напряжение зажигания каждого газового промежутка больше, чем нормальное напряжение горения, на 40—50 *в*. Отсюда следует, что четыре последовательно соединенных газовых промежутка могут одновременно загореться только при напряжении на входе $U_0 = 4 \times 70 + 4 \times 50 = 480$ *в*. При $U_0 < 480$ *в* стабиливольт не загорится. Но если в схему включены сопротивления R_1, R_2, R_3, то зажигание разряда в промежутках происходит не одновременно, а последовательно, для чего требуется значительно меньшее общее напряжение. Первым зажигается промежуток $O—C$, затем $B_1—O$ и т. д. (фиг. 13). Для того чтобы загорелся и четвертый промежуток, напряжение на входе должно быть не меньше $U_0 = 4 \times 70 + 50 = 350$ *в*.

Приведенные методы стабилизации напряжения могут быть широко использованы в схемах питания приемников, в телефонии и телеграфии, телевидении, измерительных схемах, фотометрии, пирометрии, релейных схемах и других областях.

ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ (СТАБИЛИЗАТОРЫ) НАПРЯЖЕНИЯ

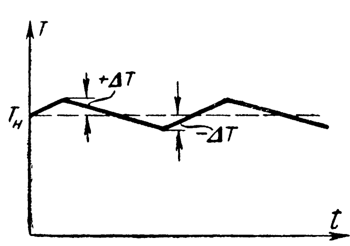
Современные схемы, питающиеся от источников постоянного тока, в ряде случаев требуют очень высокой степени стабилизации питающего напряжения, которую не могут обеспечить рассмотренные выше стабилизующие устройства. Тогда приходится применять более качественные, несколько более сложные устройства, носящие название электронных регуляторов напряжения. Лампа с холодным катодом в этих схемах используется в комбинации с электронными лампами.

Регулятором напряжения мы будем называть такое устройство, которое автоматически приводит изменяющееся по какой-либо причине напряжение к нормальному значению. Процесс регулирования протекает следующим образом: регулируемое напряжение изменяется, например возрастает на некоторую величину, действует на регулятор, который создает обратное воздействие на вход схемы и возвращает напряжение к исходному значению. Таким образом, вначале

происходит нарушение нормального режима и только благодаря этому создается обратное воздействие на вход схемы. При этом глубина пульсаций зависит от чувствительности регулятора к изменениям напряжения.

До сих пор мы рассматривали методы стабилизации напряжения, основанные на использовании естественного постоянства разности потенциалов между электродами лампы с холодным разрядом. В регуляторах напряжения мы сталкиваемся с искусственным восстановлением нарушенного процесса.

Простейший температурный регулятор, например, основан на принципе включения и выключения подогревателя. Допустим, что температура в контролируемом сосуде снизилась до нижнего контрольного предела. Тогда регулятор автоматически включит подогреватель, и температура будет повышаться. Когда она дойдет до верхнего контрольного предела, регулятор автоматически выключит подогреватель, после чего температура будет опять понижаться и т. д. Графически этот процесс показан на фиг. 18. Температура T пульсирует относительно нормального ее значения $T_н$. При этом период пульсации зависит от того, как быстро сосуд остывает и как интенсивно действует подогреватель, а глубина пульсации зависит от чувствительности регулятора к изменениям температуры.



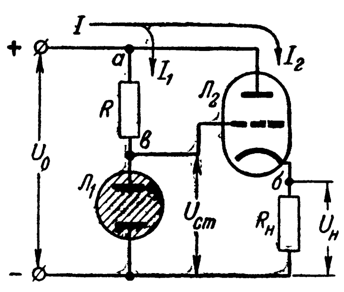
Фиг. 18. График работы регулятора температуры.

Рассмотренный метод регулирования применяется тогда, когда нужно поддерживать температуру в сосуде более высокой, чем окружающая. Метод регулирования, как видно, искусственный. Если зажать в руке сосуд или предмет, то его температура будет стабильно поддерживаться на уровне 37° С благодаря естественной способности человеческого тела сохранять постоянство температуры более высокой, чем нормальная температура окружающей среды.

Уяснив на примерах отличие процессов регулирования от стабилизации вообще, обратим внимание на характерные особенности электронных регуляторов. Видимо, качества регулятора должны определяться степенью чувствительности его к нарушениям нормального режима и способ-

ностью в минимально короткий срок произвести обратное воздействие на вход схемы. Поскольку нами рассматривается регулятор напряжения, то, следовательно, он должен быть очень чувствительным к малейшим изменениям напряжения и должен практически мгновенно приводить напряжение к нормальному значению. Желательно, чтобы как степень пульсации, так и время регулирования не зависели от степени изменения напряжения на входе.

Стабилизирующие элементы, способные реагировать на весьма малые изменения напряжения, не могут непосредственно создать достаточной мощности. Поэтому в схемах с мощным регулированием подобный элемент должен воздействовать на вход схемы не непосредственно, а через усилитель.



Фиг. 19. Простейшая схема электронного регулятора напряжения.

Электронный стабилизатор напряжения и представляет собой устройство, в котором лампа с холодным катодом (стабилизатор напряжения) сочетается с усилительными электронными лампами. Благодаря этому стабилизирующее действие лампы с холодным катодом усиливается электронной лампой.

Использование лампы с холодным катодом в качестве вспомогательного элемента схемы регулятора дает возможность определять рабочий ток схемы и пределы его изменения не параметрами лампы с холодным катодом, а параметрами электронной лампы, т. е. практически создается возможность построить электронный регулятор напряжения на токи, значительно превышающие допустимые для приборов с холодным разрядом.

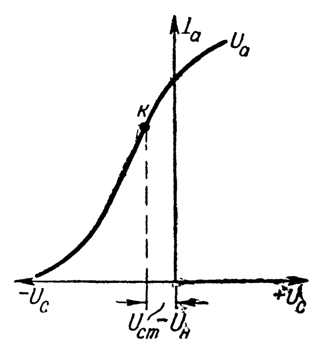
Рассмотрим действие электронного регулятора, построенного на лампе с холодным катодом $Л_1$ и трехэлектродной лампе $Л_2$ (фиг. 19).

На вход регулятора подано постоянное напряжение U_0. Ток I разветвляется в точке a на токи I_1 и I_2. Схема должна быть составлена так, чтобы ток I_2, протекающий через триод $Л_2$ и полезную нагрузку $R_н$, включенную в цепь катода этой лампы, был значительно больше тока I_1,

протекающего через газоразрядный стабилизатор $Л_1$. С другой стороны, ток I_1 должен быть не меньше $I_{мин}$ (параметр лампы с холодным катодом), т. е. должен обеспечивать нормальное течение самостоятельного тлеющего разряда.

В отличие от схемы стабилизации напряжения (фиг. 16) рабочий ток I_2, протекающий через нагрузку $R_н$, не проходит через балластное сопротивление R газоразрядной лампы.

Исходный режим схемы таков, что напряжение на катоде лампы $Л_2$ (точка *б*) несколько выше, чем напряжение на аноде стабилизатора $Л_1$ или, что одно и то же, на сетке триода $Л_2$ (точка *в*). Этим создается отрицательное смещение на сетке лампы $Л_2$, и рабочая точка для данного напряжения U_a на аноде лампы (падение напряжения на лампе) оказывается в левой части ее характеристики (точка *к* на фиг. 20).



Фиг. 20. Сеточная характеристика трехэлектродной лампы.

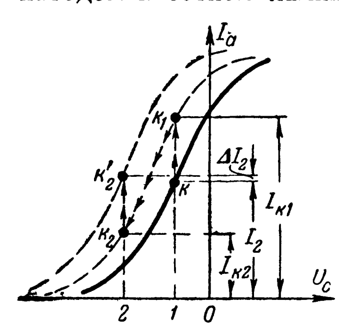
Балластное сопротивление R должно ограничивать величину тока через газоразрядную лампу в пределах $I_{мин} \div I_{макс}$. Как было указано раньше, ток в цепи лампы с холодным катодом определяется из выражения $I_1 = \frac{U_0 - U_{ст}}{R}$, откуда

$$R = \frac{U_0 - U_{ст}}{I_1}.$$

Для того чтобы проследить регулирующие свойства схемы, выведем ее из нормального исходного состояния. Пусть на входе схемы напряжение увеличилось на ΔU_0 и стало равным $U_0 + \Delta U_0$. Тогда увеличится общий ток I, но из-за большой величины ограничивающего сопротивления R вспомогательной цепи ток I_1 изменится незначительно, а потенциал в точке *в* (на сетке лампы $Л_2$) вообще не изменится благодаря стабилизирующим свойствам лампы с холодным катодом $Л_1$.

В основной цепи процесс протекания тока I_2 в изменившихся условиях будет более сложным. Поскольку общее напряжение на последовательной цепочке лампа $Л_2$ — на-

грузочное сопротивление $R_н$ увеличится, то должен увеличиться и ток I_2. На фиг. 21 этот ток определяется расположением рабочей точки на статической характеристике, соответствующей большему анодному напряжению, т. е. в точке $к_1$. Увеличившийся ток I_{k1} повысит падение напряжения на сопротивлении $R_н$. Разность потенциалов между катодом и сеткой лампы $Л_2$ возрастет, сеточное смещение увеличится и рабочая точка характеристики сдвинется влево в положение $к_2$. Это значит, что через лампу $Л_2$ будет проходить меньший ток $I_{к2}$, который создает меньшее падение напряжения на сопротивлении $R_н$. Потенциал катода понизится, сопротивление лампы $Л_2$ увеличится и напряжение на ней еще больше возрастет, а это приведет к перемещению рабочей точки в положение $к'_2$ на новой характеристике.



Фиг. 21. Процесс регулирования напряжения.

В результате увеличение тока I_2 в связи с увеличением входного напряжения будет компенсировано уменьшением этого тока за счет некоторого запирания лампы (внутреннее сопротивление лампы при запирании увеличивается). Ток I_2 принимает прежнее значение и, проходя по нагрузочному сопротивлению $R_н$, создает на нем прежнее падение напряжения.

Таким образом, и осуществляется регулирование напряжения на выходе схемы.

Совершенно ли такое регулирование и как оно зависит от качеств лампы $Л_2$? Из фиг. 21 видно, что при изменении напряжения на входе схемы благодаря ее регулирующим свойствам ток I_2 изменяется незначительно, однако он соответствует не начальной рабочей точке $к$, а точке $к'_2$, соответствующей новой характеристике при возросшем напряжении на аноде лампы. Далее видно, что напряжение U_c на сетке тоже изменилось и равно отрезку $0-2$, а не $0-1$, как это было в начале процесса. Следовательно, разность потенциалов между катодом и сеткой стала больше.

Однако нам известно, что потенциал сетки относительно отрицательного полюса схемы (точка *в* на фиг. 19), стабилизованный лампой с холодным катодом, не изменился (изменение тока в цепи лампы с холодным катодом мало благодаря большой величине сопротивления R). Отсюда следует, что изменение смещения на сетке есть следствие изменения потенциала катода лампы, при этом совершенно очевидно, что он увеличился, а не уменьшился (отрезок *0—2* больше отрезка *0—1*).

Однако это увеличение напряжения на нагрузке в цепи катода лампы в несколько раз меньше изменения напряжения на аноде лампы, а именно в μ раз (μ — коэффициент усиления лампы). Значит, если бы регулятор напряжения отсутствовал, изменение напряжения на нагрузке было бы в μ раз больше.

Таким образом, изменения напряжения на входе схемы будут сказываться на выходе схемы тем меньше, чем больше коэффициент усиления лампы.

Весьма существенно отметить, что регулирование в схеме фиг. 19 осуществляется практически мгновенно благодаря безинерционности электронных ламп. Рассмотренный нами электронный регулятор напряжения имеет бесспорное преимущество перед другими типами регуляторов по своей чувствительности и быстроте реагирования.

Изменение внутреннего сопротивления R_i лампы $Л_2$ при изменении входного напряжения U_0 схемы может быть определено из следующих соотношений.

В нормальном режиме ток I_2 определяется из выражения

$$I_2 = \frac{U_0}{R_i + R_н}.$$

При увеличении входного напряжения схемы до величины $U_0 + \Delta U_0$ благодаря регулирующему действию схемы ток I_2 остается прежним, но теперь он равен:

$$I_2 = \frac{U_0 + \Delta U_0}{R_i + \Delta R_i + R_н},$$

где $R_i + \Delta R_i$ — внутреннее сопротивление лампы при новом (большем) падении напряжения на лампе.

Исключив I_2 из обоих выражений и решая его относительно ΔR_i, находим, что

$$\Delta R_i = \frac{\Delta U_0}{U_0} \cdot (R_i + R_н).$$

В действительности ток в конце режима несколько отличается от тока в начале режима. Это изменение тока показано на фиг. 21 величиной ΔI_2.

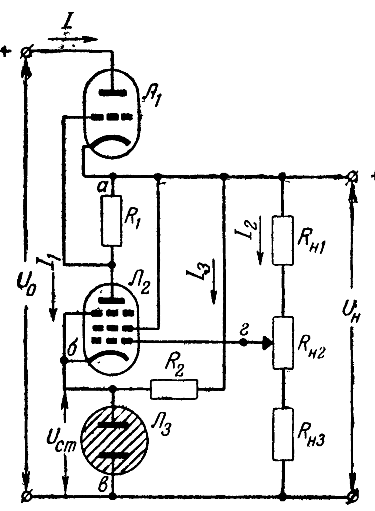
Величина приращения напряжения на полезной нагрузке может быть найдена как

$$\Delta U_н = \Delta I_2 R_н,$$

откуда

$$\Delta I_2 = \frac{\Delta U_н}{R_н}.$$

Коэффициенты усиления μ трехэлектродных ламп лежат в пределах 10 — 100. Отсюда следует, что, применяя схемы, подобные показанной на фиг. 19, можно добиться ослабления медленных пульсаций питающих напряжений в 10 — 100 раз.



Фиг. 22. Принципиальная схема электронного регулятора напряжения.

Большое R_i трехэлектродных ламп (5 000 — 50 000 *ом*) заставляет повышать входное напряжение U_0 схемы, чтобы обеспечить нужное напряжение на полезной нагрузке, так как $U_0 = U_a + U_н$, где U_0 — напряжение на входе схемы; U_a — падение напряжения на лампе $Л_2$; $U_н$ — напряжение на полезной нагрузке $R_н$.

На фиг. 22 представлена более совершенная схема регулятора напряжения (схема с дополнительной высокочувствительной электронной лампой $Л_2$, включенной в цепь параллельно основной нагрузке).

На вход схемы подано напряжение U_0. Ток I проходит через трехэлектродную лампу $Л_1$ и разветвляется в точке *a*. Ток I_2 (основной ток схемы) проходит через потенциометр нагрузки $R_н = R_{н1} + R_{н2} + R_{н3}$. Ток I_1 проходит через сопротивление R_1, пятиэлектродную лампу $Л_2$ и газовый стабилизатор $Л_3$. Сопротивление R_1 является анодной на-

грузкой лампы $Л_2$, сопротивление R_2 поставлено для того, чтобы в начальный момент обеспечить зажигание лампы $Л_3$.

Оно должно быть большим, чтобы не шунтировать цепь *а — б*. Ток I_3 в рабочем режиме схемы желательно иметь очень малым, чтобы им можно было пренебречь в сравнении с током I_1.

Рассмотрим работу схемы фиг. 22.

Пусть на входе схемы напряжение увеличилось на ΔU_0 и стало равно $U_0 + \Delta U_0$. Тогда сразу же должен увеличиться общий ток I и нагрузочный ток I_2. Поскольку сопротивление потенциометра $R_н$ постоянно, увеличившийся ток I_2 создаст на нем увеличенное падение напряжения и потенциал точки *а* повысится. При этом напряжение на участке *а — в*, а следовательно, и ток I_1 возрастут, напряжение же между точками *б — в* останется прежним благодаря стабилизирующим свойствам лампы $Л_3$. Отсюда следует, что увеличится напряжение только на участке *а — б* регулирующей цепочки.

Обратим внимание на цепь первой (от катода) сетки лампы $Л_2$. Как видно, сетка этой лампы присоединена к движку средней части потенциометра $R_н$, и потенциал сетки вначале может быть подобран наиболее целесообразно (ниже будет показано, как следует устанавливать начальный сеточный потенциал). В изменившемся режиме напряжение на сетке лампы $Л_2$ увеличится, так как увеличилось общее напряжение на потенциометре $R_н$. Элементы схемы должны быть подобраны так, чтобы напряжение на первой сетке было меньше напряжения на катоде лампы $Л_2$, т. е. лампа должна работать с отрицательным смещением.

Как известно, пятиэлектродная лампа отличается от трехэлектродной тем, что ток, протекающий через пятиэлектродную лампу, почти не зависит от изменений напряжений на аноде и очень сильно зависит от изменений напряжения на управляющей (первой от катода) сетке. Кроме того, пятиэлектродная лампа обладает большим коэффициентом усиления μ, и управление током в лампе весьма эффективно осуществляется с помощью незначительных изменений потенциала ее управляющей сетки.

Итак, возросший потенциал сетки лампы $Л_2$ несколько отпирает лампу, и ток через нее, а следовательно, и через анодную нагрузку R_1 увеличивается.

Как видно из схемы, основная трехэлектродная лампа включена так, что напряжение на сопротивлении R_1 является автоматическим смещением на сетке этой лампы. Увеличившееся смещение приведет к увеличению внутреннего сопротивления лампы $Л_1$, благодаря чему уменьшится основной ток I. Ток I_2 при этом тоже уменьшится и на потенциометре $R_н$ восстановится нормальное значение напряжения $U_н$.

Регулятор, собранный по схеме фиг. 22, благодаря очень большой чувствительности пятиэлектродной лампы мгновенно реагирует на самые незначительные пульсации входного напряжения и уменьшает их на потенциометре $R_н$ (по сравнению с пульсациями его на входе схемы) до практически ничтожной величины. Как видно, здесь усилительные свойства пятиэлектродной лампой еще дополняются усилительными свойствами трехэлектродной лампы. В отличие от схемы фиг. 19 здесь из-за большого усиления лампы $Л_2$ можно применить лампу $Л_1$ (триод) с малым μ, но с большим рабочим током, что весьма важно.

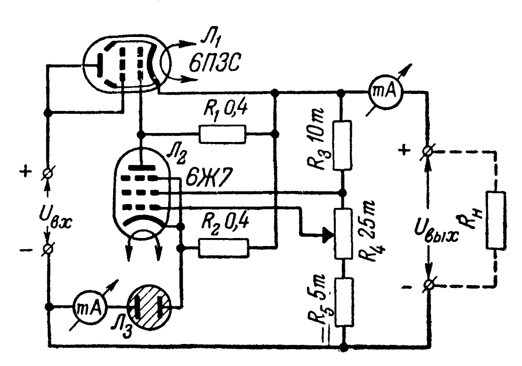
Проследим работу схемы регулятора при постоянном напряжении на входе и при подключении к потенциометру $R_н$ параллельных сопротивлений.

В этом случае ток I_2 разделится и через потенциометр $R_н$ будет проходить несколько меньший ток. Тогда уменьшится потенциал точки *г* и увеличится отрицательное смещение на управляющей сетке лампы $Л_2$. Последняя будет несколько заперта и ток через нее, а следовательно, и через сопротивление R_1 уменьшится. Смещение на сетке лампы $Л_1$ станет меньшим, лампа отопрется (сопротивление ее заметно упадет) и общий ток I возрастет. Вследствие этого возрастет и ток I_2 до прежней величины.

Таким образом, уменьшение тока через потенциометр $R_н$, вызванное шунтированием его параллельными нагрузками, будет компенсировано увеличением общего тока I, вызванное уменьшением сопротивления лампы $Л_1$. Такое замечательное регулирование напряжения возможно только благодаря лампе с холодным катодом, которая, стабилизируя потенциал катода лампы $Л_2$, дает возможность создать отрицательный потенциал на управляющей сетке этой лампы и осуществить тем самым эффективную отрицательную обратную связь.

Для оценки качеств электронного регулятора напряжения, собранного по принципиальной схеме фиг. 22, рассмотрим реальную схему, показанную на фиг. 23, и приведем результаты ее исследования.

Регулятор напряжения, собранный на лампах 6П3С, 6Ж7 и миниатюрной неоновой лампе (в качестве стабилизатора), предназначался для питания нагрузки $R_н$ стабильным напряжением от источника $U_{вх}$. При исследовании схемы производились изменения входного напряжения $U_{вх}$ и изменения сопротивления $R_н$ в широких пределах. Наблюдения



Фиг. 23. Практическая принципиальная схема электронного регулятора напряжения.

велись за изменением напряжения $U_{вых}$, за током через регулирующую неоновую лампу $Л_3$ и за током через сопротивление нагрузки $R_н$.

Существенное значение в этой схеме имеет выбор исходного режима регулирующей цепи с неоновой лампой. Режим ее устанавливается (с помощью переменного сопротивления R_4) подбором наивыгоднейшего потенциала управляющей сетки лампы 6Ж7.

Лампа 6П3С в схеме фиг. 23 обеспечивает значительный рабочий ток схемы. Правда, в схеме трехэлектродного включения она имеет небольшой коэффициент усиления, но это несущественно, так как основную регулирующую роль играет лампа 6Ж7 (пентод с высоким коэффициентом усиления). Неоновая лампа $Л_3$ стабильно удерживает напряжение между катодом лампы 6Ж7 и общим минусом схемы. Высокая степень стабилизации потенциала катода этой

лампы обеспечивается тем, что в режиме регулирования очень незначительно меняется ток, протекающий через неоновую лампу.

В табл. 1 дана зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ от изменения величины нагрузочного сопротивления $R_н$ при постоянном входном напряжении $U_{вх} = 300$ *в*.

Таблица 1

$R_н$, *ком*	∞	40	20	10	6	4,5
$U_{вых}$, *в*	202	202	203	203	196	190

Эта таблица показывает, что в широком диапазоне изменения величины сопротивления нагрузки выходное напряжение практически остается постоянным.

Табл. 2 показывает, что режим стабилизации напряжения зависит от начального отрицательного напряжения смещения U_c на управляющей сетке лампы 6Ж7 и что, кроме того, с увеличением напряжения смещения величина стабилизованного напряжения меняется. Следовательно, изменением положения движка потенциометра R_4 можно подбирать нужную величину выходного напряжения.

Таблица 2

U_c, *в*	0	—1	—2	—3	—5	—7
$U_{вх}$, *в*	$U_{вых}$, *в*					
300	130	135	155	170	190	210
350	140	137	155	170	190	210
400	150	140	155	170	190	210
450	160	140	155	170	190	210
500	162	145	158	170	190	210

Качество стабилизации меняется с изменением напряжения смещения на управляющей сетке лампы $Л_2$. Из табл. 2 следует, что для повышения качества стабилизации желательно увеличивать напряжение смещения. В действительности такое увеличение можно рекомендовать только в тех случаях, когда ожидается изменение входного напря-

жения и не ожидается изменение нагрузочного сопротивления. Если же источник питает схему, сопротивление которой изменяется, то выгоднее выбрать режим с относительно небольшим смещением на сетке лампы $Л_2$.

В табл. 3 приведены данные, характеризующие зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ и тока $I_{нл}$ через неоновую лампу $Л_3$ от величины сопротивления нагрузки $R_н$ при различных начальных значениях напряжения смещения U_c на сетке лампы $Л_2$ типа 6Ж7.

Таблица 3

U_c, *в*	0		−1		−3		−5	
$R_н$, *ком*	$U_{вых}$, *в*	$I_{нл}$, *мка*	$U_{вых}$, *в*	$I_{нл}$, *мка*	$U_{вых}$, *в*	$I_{нл}$, *мка*	$U_{вых}$, *в*	$I_{нл}$, *мка*
2,5	120	230	130	105	—	—	—	—
5	120	180	130	98	170	70	—	—
10	119	150	130	91	170	65	210	49
17,5	118	120	130	88	170	60	211	41
35	118	93	130	62	171	48	212	30
50	118	50	130	30	172	30	215	—

Из табл. 3 следует, что наилучший результат стабилизации будет при напряжении смещения U_c, равном — 1 *в*.

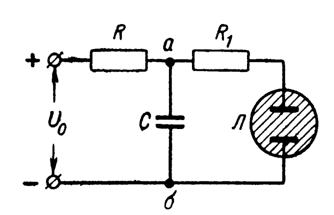
Практически отрицательное напряжение смещения на управляющей сетке лампы $Л_2$ принимают равным 1 — 3 *в*.

В сравнении с простой схемой стабилизации, выполненной на одной лампе с холодным катодом, схема электронного регулирования имеет бесспорное преимущество. Так, в рассмотренной нами схеме изменение входного напряжения в 400 *в* на ±50 *в* не вызывает заметного изменения напряжения на выходе, в то время как такое же изменение напряжения на входе газового стабилизатора (фиг. 16) вызывало изменение стабилизованного напряжения на выходе в 0,5 *в* на каждом газовом промежутке или в 2 *в* на всем стабиливольте, что составляет 0,7% стабилизованного напряжения.

ГЕНЕРАТОР НА ЛАМПЕ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Лампа с холодным катодом может быть использована и в качестве генератора пилообразных напряжений, работа которого основана на способности лампы быстро менять внутреннее сопротивление протекающему через нее току.

Как было установлено ранее, лампа с холодным катодом при некотором напряжении $U_з$ на ее электродах пробивается, т. е. в ней возникает тлеющий разряд. Затем при уменьшении разрядного тока разряд прекращается и лампа восстанавливает свое первоначальное (теоретически бесконечно большое) сопротивление.



Фиг. 24. Схема простейшего генератора на лампе с холодным катодом.

Работу лампы в схеме генератора пилообразного напряжения рассмотрим на схеме фиг. 24.

Если к схеме подвести напряжение U_0, то будет происходить заряд конденсатора C через сопротивление R. При заряде же конденсатора в цепочке, состоящей из RC, напряжение на нем изменяется по следующему закону:

$$u = U_0 (1 - e^{-\frac{t}{RC}}),$$

где u — напряжение на конденсаторе (между точками a и $б$), *в*;

U_0 — постоянное напряжение на входе схемы, *в*;

e — основание натуральных логарифмов, равное 2,72;

t — время заряда, сек.;

RC — произведение из величины сопротивления R и емкости конденсатора C.

Произведение из RC носит название **постоянной времени заряда конденсатора**. Физический смысл этой величины будет вскрыт несколько ниже.

Представим себе, что время, в течение которого заряжается конденсатор, выраженное в секундах, равно величине RC, т. е. $T = RC$. Тогда $\frac{T}{RC} = 1$.

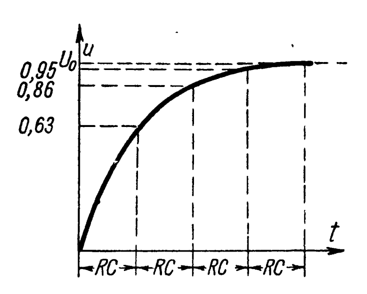
Определим напряжение на конденсаторе в момент времени $T = RC$:

$$u = U_0 (1 - e^{-1}) = U_0\left(1 - \frac{1}{e}\right) = 0{,}63U_0.$$

Таким образом, за время RC сек. конденсатор зарядится до 63% полной величины напряжения.

Если время заряда равно $2{,}3RC$, то напряжение u на конденсаторе достигнет 90% полной величины напряжения заряда U_0. В течение следующих $2{,}3RC$ напряжение на конденсаторе увеличится на 90% от остающихся 10% заряда. Еще через $2{,}3RC$ напряжение u возрастет на 90% остатка и т. д.

Отсюда видно, что уже через время, равное $6{,}9RC$, напряжение на конденсаторе возрастет до 99,9% всего заряда. Теоретически конденсатор зарядится до полного напряжения U_0 через бесконечно большой промежуток времени. Однако на практике можно считать конденсатор полностью зарядившимся за время $T = 5RC$ сек.



Фиг. 25. График изменения напряжения на конденсаторе от времени при ее заряде.

Отметим, что разряд конденсатора за время, равное RC, происходит до 37% полного напряжения U_0. Время, за которое конденсатор заряжается до 63% полного напряжения или разряжается до 37%, носит название **постоянной времени цепи**. Величина постоянной времени в секундах равна произведению сопротивления в омах на емкость в фарадах.

Приведем некоторые, часто встречающиеся соотношения RC:

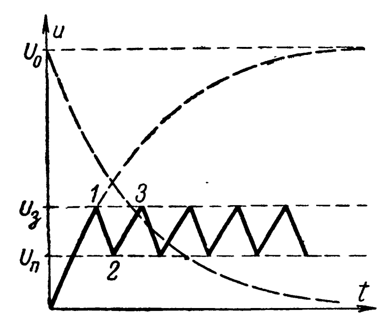
R (в омах) $\times C$ (в фарадах) $= t$ (в секундах);
R (в мегомах) $\times C$ (в микрофарадах) $= t$ (в секундах);
R (в омах) $\times C$ (в микрофарадах) $= t$ (в микросекундах);
R (в мегомах) $\times C$ (в микромикрофарадах) $= t$ (в микросекундах).

Так, цепочка, состоящая из $R = 10$ *мгом* и $C = 500$ *мкмкф*, имеет постоянную времени $RC = 10 \times 500 = 5\,000$ *мксек*, т. е. в такой цепочке конденсатор C зарядится до 63% полного напряжения через 5 000 *мксек*.

Вернемся к схеме фиг. 24. Поскольку цепочка RC обладает определенной постоянной времени, то конденсатор некоторое время будет заряжаться по закону, выраженному графически на фиг. 25. Когда напражение на конденсаторе (в точках *а*—*б*) достигнет величины $U_з$ (напряжения зажи-

гания лампы *Л*), в лампе *Л*, подключенной параллельно конденсатору *С*, возникнет тлеющий разряд, проводимость лампы резко изменится (станет сравнительно небольшой) и конденсатор будет разряжаться через нее.

Если сопротивление R_1 мало по сравнению с R, т. е. $R_1 \ll R$, то разряд конденсатора будет протекать значительно быстрее, чем заряд. Напряжение на конденсаторе *С* будет падать, как это показано отрезком *1—2* на фиг. 26. Когда напряжение на конденсаторе упадет до величины $U_п$ (напряжение потухания лампы), разряд прекратится, и лампа опять будет обладать огромным сопротивлением. Тогда цепь разряда конденсатора *С* разомкнется и напряжение на конденсаторе снова будет возрастать (отрезок *2—3*), пока при напряжении, равном $U_з$, не произойдет новый пробой лампы. Описанный выше процесс разряда конденсатора при этом повторится и напряжение на зажимах *а—б* конденсатора будет пульсировать по характерному закону, имеющему вид, близкий к пилообразной кривой.



Фиг. 26. График изменения напряжения на конденсаторе при $U_0 \gg U_з$.

Нетрудно видеть, что, применив лампу с большим $U_з$ или подав на вход схемы меньшее напряжение, получим пульсирующее напряжение, показанное графически на фиг. 27. При напряжении зажигания лампы, значительно меньшем в сравнении с напряжением на входе, нарастание напряжения на конденсаторе будет происходить практически прямолинейно (фиг. 26).

Выясним количественные зависимости между элементами схемы фиг. 24.

Расчет схемы следует производить, исходя из заданных параметров лампы с холодным разрядом. Полагаем, что параметры лампы нам известны (к ним относятся: $I_{макс}$ — максимально допустимый ток, $U_з$ — потенциал зажигания и $U_п$ — потенциал потухания).

Следует создать такие условия разряда конденсатора, при которых ток, проходящий через лампу, не превышал

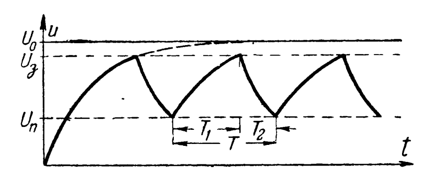
$I_{макс}$. Отсюда можно определить ограничивающее сопротивление R_1 в цепи анода лампы $Л$:

$$R_1 = \frac{U_з}{I_{макс}}.$$

Величину сопротивления R можно определить из следующих соображений: сопротивление заряда (R) во столько раз больше сопротивления разряда (R_1), во сколько время заряда больше времени разряда. Время цикла (заряд—разряд) называется периодом $T = T_1 + T_2$ (фиг. 27) пилообразного напряжения. Так как $\frac{T_1}{T_2} = \frac{R}{R_1}$, то $R = R_1 \frac{T_1}{T_2}$. Здесь отношение $\frac{T_1}{T_2}$ — всегда величина заданная (обычно заданы и сами T_1 и T_2).

Емкость C можно найти по формуле

$$C = \frac{T_1}{R \ln \frac{U_0 - U_n}{U_0 - U_з}}.$$



Фиг. 27. График изменения напряжения на конденсаторе при U_0, близком к $U_з$.

Если составить схему (фиг. 24) из $R = 1$ *мгом* (10^6 *ом*), $C = 1$ *мкф* (10^{-6} *ф*) и $R_1 = 20\,000$ *ом* ($20 \cdot 10^3$ *ом*) на лампе с потенциалом зажигания $U_з = 120$ *в* и потенциалом гашения (потухания) $U_n = 80$ *в* при входном напряжении схемы $U_0 = 130$ *в*, то период генератора будет равен:

$$T_1 = RC \cdot \ln \frac{U_0 - U_n}{U_0 - U_з} = 10^6 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \frac{130 - 80}{130 - 120} \approx 1{,}61 \text{ сек.},$$

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{R_1}{R} = 1{,}6 \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{10^6} = 0{,}032 \text{ сек.}$$

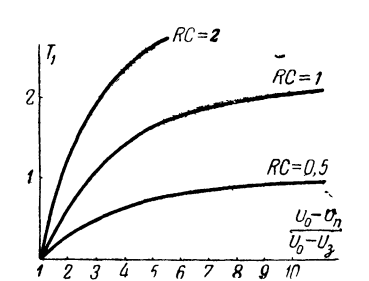
и

$$T = T_1 + T_2 = 1{,}61 + 0{,}032 = 1{,}642 \text{ сек.}$$

Из расчета видно, что лампа будет вспыхивать на 0,032 сек. через каждые 1,61 сек.

Изменяя напряжение на входе, можно в широких пределах менять время T_1. Зависимость T_1 от входного напряжения для различных RC представлена на фиг. 28.

Из графика фиг. 28 следует, что с увеличением отношения $\frac{U_0 - U_n}{U_0 - U_з}$ время заряда растет (при приближении входного напряжения к значению потенциала зажигания знаменатель дроби уменьшается, а сама дробь увеличивается).



Фиг. 28. Зависимость периода заряда от входного напряжения для различных RC.

При заданном входном напряжении время T_1 линейно зависит от R и от C. Эти зависимости легко могут быть построены графически подобно фиг. 28.

Генератор пилообразного напряжения может быть использован как для создания линейно нарастающего напряжения, так и в качестве пускового или счетного устройства.

Следует отметить, что у генератора колебаний на лампе с холодным катодом весьма нестабильная частота колебаний. Получается это вследствие того, что величины $U_з$ и U_n у одной и той же лампы могут изменяться от периода к периоду, а изменение этих величин изменяет и период T_1.

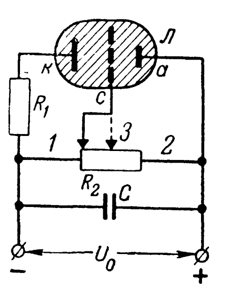
ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

До сих пор мы рассматривали наиболее простой тип ламп с холодным катодом—двухэлектродные газоразрядные лампы. Физические процессы в таких лампах гораздо сложнее, чем в двухэлектродных вакуумных лампах (например, кенотронах).

Введение дополнительного электрода-сетки в двухэлектродную вакуумную лампу значительно расширило возможности применения этих ламп в электрических цепях. Введение дополнительного — третьего — электрода в двухэлектродную газонаполненную лампу с холодным катодом тоже расширило область применения ламп с холодным катодом, однако возможности использования таких ламп ограничиваются сложностью управления происходящими в них физическими процессами.

Ниже мы рассмотрим свойства трехэлектродных газоразрядных ламп. Отметим, что внешнее сходство названий, принятых для электродов радиоламп и ламп с холодным

катодом, чисто условное. Поэтому не следует думать, что одноименные электроды этих ламп имеют одинаковое значение. Мы знаем, что катод лампы с тлеющим разрядом не разогревается, как это имеет место в радиолампах, но электроны все же испускает. Нам важно установить, что электрод, носящий название „сетка“, у газоразрядной лампы служит для целей, отличных от назначения сетки у радиолампы. Так, сетка радиолампы может лампу запирать, отпирать, пропускать через лампу ток большей или меньшей величины. Для этого достаточно только менять потенциал сетки относительно катода. При этом частота таких изменений может быть очень высокой, так как управление током через лампу безинерционно, что очень существенно.



Фиг. 29. Схема работы трехэлектродной газоразрядной лампы.

В газоразрядной лампе электрод, носящий название сетки, выполняет более скромную роль. Сетка лампы с холодным катодом может отпирать лампу, но не может ее запирать: она может определить напряжение зажигания лампы, но не может погасить лампу, как бы ни менялся ее потенциал. Сетка газоразрядного прибора бессильна что-нибудь сделать с проходящим через лампу током. Наконец, процесс, происходящий в лампе при зажигании или гашении, протекает во времени так, что лампу можно считать безинерционной только в очень ограниченных по частоте пределах.

Рассмотрим принцип работы трехэлектродной газоразрядной лампы *Л* в схеме фиг. 29. В баллоне, наполненном газом, размещены три электрода так, что сетка *с* находится близко от анода, экранируя электростатическое поле анод—катод. Между анодом *а* и катодом *к* создана разность потенциалов подключением источника питания к точкам *1* и *2* схемы. Вывод третьего электрода-сетки присоединен к движку потенциометра R_2. Если движок потенциометра установить в левом крайнем положении, то разность потенциалов между электродами сетка—анод будет равна разности потенциалов между анодом и катодом.

Работа схемы основана на использовании свойств газоразрядной лампы, способной зажигаться при напряжении, величина которого определяется размерами газового промежутка при заданном давлении. Ранее была показана

зависимость потенциала зажигания лампы от произведения давления в ней на расстояние между электродами. Как видно из графика фиг. 6 (см. стр. 15), лампа будет зажигаться при напряжении на аноде, равном $U_{з1}$, если произведение давления в лампе на расстояние между ее электродами будет равно pr_1 и соответственно при $U_{з2}$ для pr_2, а также при $U_{з3}$ для pr_3.

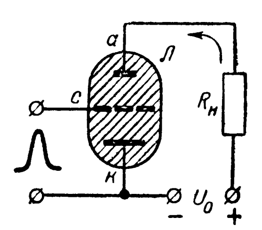
Представим теперь, что в лампе *Л* (фиг. 29) созданы именно такие условия, которые отвечают соотношениям pr_1 и $U_{з1}$ для промежутка сетка—анод. Напряжение, созданное между этими электродами внешним источником, в действительности равно U_0. Если потенциал зажигания $U_{з1}$ газового промежутка сетка—анод больше действительной разности потенциалов между этими электродами, то разряд не возникает. Между электродами анод—катод, для которых произведение давления на междуэлектродное расстояние равно pr_2, разряд возникнуть тоже не может даже при $U_0 > U_{з2}$ потому, что сетка экранирует их друг от друга (силовые линии электростатического поля, идущие от анода, замыкаются на сетке).

Будем перемещать движок потенциометра R_2 из положения *1* к другому его концу, постепенно увеличивая этим разность потенциалов между электродами сетка—катод. Пусть при положении движка потенциометра в точке *3* разность потенциалов между сеткой и катодом станет равной потенциалу зажигания данного газового промежутка. Тогда произойдет мгновенный пробой газового промежутка сетка—катод. Колба окажется наполненной ионизированным газом, а это будет способствовать распространению газового разряда на весь промежуток анод—катод.

Теперь, когда холодный разряд существует между основными электродами прибора, можно как угодно перемещать движок потенциометра R_2, т. е. можно как угодно менять потенциал сетки. Влияния на протекающий в лампе разряд оказать уже нельзя. Однако, чтобы не создавать тока в цепи сетки, целесообразно сразу после зажигания лампы снизить напряжение на ее сетке до потенциала катода.

Ограниченность действия сетки объясняется следующим образом. Сетка помещена в пространстве, заполненном электрическими зарядами. При попытке погасить лампу подачей на ее сетку отрицательного потенциала (зарядить

ее отрицательно относительно катода) положительно заряженные ионы (отсутствующие в электронных лампах) устремляются к сетке и нейтрализуют ее заряд, вызывая в ее цепи ток. Чем больше отрицательный заряд сетки, тем большее число ионов устремляется к ней и, следовательно, тем больший ток будет в цепи сетки. Больший ток сетки может разогреть ее и вызвать опасность термоэлектронной эмиссии, а также опасность недопустимого разогрева места впая сетки в стекло. Поэтому пытаться запирать лампу отрицательным потенциалом на ее сетке не только бесполезно, но и опасно. Во всех случаях для уменьшения возможного тока в цепи сетки лампы следует в эту цепь включать сопротивление.



Фиг. 30. Принципиальная схема включения трехэлектродной газоразрядной лампы.

Трехэлектродная лампа с холодным катодом может быть использована в качестве запускающего прибора. В современных электронных схемах бывает необходимо подавать питающее напряжение на аноды ламп с определенной закономерностью. Это напряжение может быть относительно большим и манипуляции с ним производить не совсем удобно. В этих случаях применяют трехэлектродные лампы с холодным катодом.

На фиг. 30 изображена принципиальная схема, в которой нагрузка $R_н$ питается от источника U_0 через трехэлектродную лампу с холодным катодом *Л*. Лампа находится в таком режиме, что напряжение U_0 не может обеспечить пробоя газового промежутка из-за экранирования анода сеткой, имеющей в начале нулевой потенциал. На сетку лампы в определенный момент времени подается положительное напряжение в виде короткого импульса. Тогда газовый промежуток сетка — катод мгновенно пробивается и разряд перебрасывается на весь промежуток анод—катод. Лампа делается проводящей для основного источника, и по нагрузке $R_н$ проходит ток. Ток через лампу, а следовательно, и через нагрузку будет проходить до тех пор, пока не будет снято напряжение с анода лампы.

В практических схемах источником, питающим нагрузку, может быть конденсатор, который, накопив энергию, разряжается в определенный промежуток времени через на-

грузку и лампу. Когда конденсатор разрядится, лампа погаснет. Затем конденсатор опять скапливает энергию, на сетку лампы подается новый импульс положительного напряжения, лампа пробивается и конденсатор вновь разряжается на нагрузку.

Область возможного применения трехэлектродных ламп с холодным разрядом еще не определилась. Однако электрические пусковые схемы, счетные и контрольные схемы уже включают в себя эти лампы. Существенным недостатком таких ламп является непостоянство потенциала зажигания. Этот недостаток лампы заставляет зажигать ее напряжением на сетке с очень крутым фронтом импульса.

РАЗНОВИДНОСТИ ЛАМП С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Мы рассмотрели свойства ламп с холодным катодом, в которых происходит холодный или, как его иначе называют, тлеющий разряд. Качества этих приборов были оценены и возможности применения их для технических целей выяснены.

Лампы, которые мы кратко рассмотрим ниже, тоже имеют холодный катод, но отличаются они от рассмотренных нами тем, что разряд в них происходит не тлеющий (слаботочный, маломощный), а дуговой (сильноточный, мощный).

Разряд в дуговой лампе с твердыми электродами развивается следующим образом. Сначала, как только лампа зажжется, развивается слабый тлеющий разряд. Далее, если нет ограничивающих величину тока сопротивлений, разряд из нормального тлеющего переходит в аномальный тлеющий и затем лавинообразно переходит в мощный дуговой. В лампах дугового разряда с жидким (ртутным) катодом принудительно создается искровой разряд, который вызывает электронную эмиссию с поверхности ртути. Затем возникает дуга, создается значительный объемный заряд положительных ионов у катода и благодаря высокому градиенту поля у катода создаются условия для автоэлектронной эмиссии.

Что же отличает дуговой разряд от тлеющего с количественной стороны?

При дуговом разряде через лампу протекает большой ток, но на междуэлектродном газовом промежутке прибора падение напряжения очень незначительное. При холодном разряде через прибор протекает небольшой ток, но на га-

зовом промежутке прибора падение напряжения относительно велико. Так, для большинства дуговых ламп падение напряжения на газовом промежутке составляет 12—25 *в*. Эти лампы различаются по нормальному для них рабочему току. Величина тока дуговой лампы лежит в пределах 10—200 *а*. Лампы с холодным разрядом рассчитаны на рабочий ток 1—100 *ма* при нормальном напряжении порядка 60—500 *в*.

Различие величины токов и напряжений дуговых и холодных ламп можно представить себе еще и так. Газовый промежуток лампы при дуговом разряде имеет хорошую проводимость и соответственно очень малое сопротивление. Газовый промежуток лампы при тлеющем разряде имеет относительно плохую проводимость, т. е. значительное сопротивление.

Что всякий холодный разряд может развиться в дуговой, нам уже известно. Ранее было указано, что если лампу тлеющего разряда включить в цепь источника питания без ограничивающего сопротивления, то сразу после зажигания лампы напряжение на ней упадет, ток резко возрастет и лампа погибнет.

Во всех ли случаях она погибнет? Нет, если источник питания маломощный и внутреннее сопротивление его велико, то одновременно с увеличением тока через лампу увеличится и падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника. Напряжение на внешних зажимах источника упадет, и лампа, подключенная к этим зажимам, будет работать.

Подобные случаи имеют место на практике, так как лампы с холодным разрядом обычно используются в схемах, питающихся от маломощных источников. Однако наблюдение за подобными явлениями, к сожалению, часто ведет к неправильному заключению о «прочности» лампы. Создается ошибочное впечатление о том, что лампу можно вообще включать без ограничивающего сопротивления. Такая попытка делается в иных условиях, при мощных источниках, и тогда лампа неминуемо погибает. Имеются, однако, специальные лампы, в которых холодный разряд, как правило, переходит в дуговой, но лампа при этом не погибает. Правда, последнее условие для большинства из таких ламп выполняется только в том случае, если дуговой разряд будет кратковременным.

Рассмотрим несколько газоразрядных ламп с дуговым разрядом, имеющих широкое техническое применение и интересных по происходящим в них физическим процессам.

Газоразрядник. Лампы этого типа предназначены для защиты чувствительных электрических приборов, установленных на концах длинных линий, от перенапряжений, которые могут возникнуть в таких линиях. Примером могут служить самопишущие электромеханические приборы, установленные на конце длинной телеграфной линии, или радиоприемник, соединенный с антенной.

Газоразрядник представляет собой прибор, подобный неоновой лампе или стабилизатору напряжения, в которых при определенной разности потенциалов на электродах возникает тлеющий разряд. Зажигание лампы происходит при напряжении, несколько большем, чем нормальное напряжение, поддерживающее тлеющий разряд. Такая лампа включается в линию без ограничивающего сопротивления, поэтому тлеющий разряд в ней мгновенно (в действительности не более чем через 0,05 сек.) переходит в дуговой. Рассчитана она на кратковременное перенапряжение в линиях, а следовательно, на кратковременное протекание дугового разряда. После устранения перенапряжения сопротивление лампы восстанавливается в течение нескольких минут (в зависимости от типа разрядника) и затем она снова может быть приведена в действие вновь создавшимся перенапряжением в линии. Под восстановлением газоразрядника следует понимать такое восстановление первоначального сопротивления лампы, при котором она может пробиваться от напряжений, отличающихся от номинальных не более чем на 10%.

Что же представляет собой разрядник?

Прибор обычно наполняется инертными газами или водородом. Степень наполнения лампы газом определяет потенциал ее зажигания. Электроды (одинаковые) разрядников на небольшую мощность делаются из алюминия. Размер пластинки и металлические выводы рассчитаны на пропускание кратковременного тока до 3 *а*. Расстояние между электродами равно 2—3 *мм*.

Другим типом разрядника является бариевый разрядник. Электроды его, включающие в себя термитную смесь, обрабатываются таким образом, что на поверхности образуется чистый металлический барий. Активные свойства электродов дают возможность ускорить процесс возникно-

вения дуги, а малая работа выхода бария обеспечивает большой разрядный ток. В отличие от алюминиевых бариевые разрядники рассчитываются на рабочий ток порядка 30 *а* и допускают несколько бо́льшую продолжительность разряда (10 сек).

Ртутный выпрямитель. Лампа представляет собой своеобразный и довольно странный на первый взгляд стеклянный сосуд, на дне которого размещена жидкая ртуть. Сложная и неудобная форма баллона, жесткие условия эксплуатации (заставляющие устанавливать прибор в строго вертикальном положении), высокие требования к транспортировке и необходимость поддержания жестких температурных условий (таких, чтобы температура была не выше 35° С и не ниже —15° С) создают невыгодное впечатление о такой лампе.

Ртутный выпрямитель относится к категории ламп с холодным катодом, но с дуговым разрядом. Рассмотрим процесс возникновения и развития разряда в такой лампе.

Ртуть, находящаяся на дне колбы, замыкает электрическую цепь. При покачивании колбы этот жидкий проводник разрывается и в момент разрыва между расходящимися частями ртути проскакивает искра (благодаря большому электрическому градиенту). В месте искрового разряда, на поверхности ртути, создается очаг электронной эмиссии. Электроны устремляются к одному из положительно заряженных электродов (потенциал которого выше) и на своем пути ионизируют частицы ртутных паров. Возникает мощный дуговой разряд между анодом и «светлым пятном» на поверхности ртути. Плотность тока дугового разряда весьма велика. Поэтому в нормальных условиях работы не вся поверхность ртутного катода является рабочей, а только небольшая часть ее, называемая «светлым пятном» (благодаря яркому свечению). Каждый квадратный сантиметр поверхности ртути способен создать электронный ток в 4 000 *а*. Однако рабочий ток лампы гораздо меньше, так как сечение дуги или поверхность «светлого пятна» значительно меньше 1 $см^2$.

В месте «светлого пятна» поверхность ртути вдавливается и с нее происходит испарение ртути. Неравномерность этого процесса приводит к тому, что «светлое пятно» не стоит на месте, а беспорядочно перемещается со скоростью порядка 10 *м/сек*. Мощный дуговой столб содержит в себе электроны, положительно заряженные ионизи-

рованные атомы ртути, возбужденные атомы ртути и нейтральные частицы.

Существенно отметить, что в случае дугового разряда пространственный заряд электронов в значительной степени компенсируется пространственным зарядом ионов, что создает весьма незначительное падение напряжения на дуговом промежутке, которое почти полностью определяется ионизационным потенциалом паров ртути. Мощный дуговой разряд в лампе поддерживается самостоятельно благодаря автоэлектронной эмиссии (эмиссия электронов из катода под действием сильного электрического поля). Вблизи поверхности катода скапливается положительный пространственный заряд ионов большой плотности и создается сильное электрическое поле, которое и вырывает электроны с поверхности ртути.

Что же замечательного в этой лампе? Почему такой странный по виду, неудобный в эксплуатации прибор получил широкое применение в технике? Зачем прибору придана такая неудобная форма? И, наконец, почему внутри баллона помещена жидкая ртуть?

Ртутная лампа выполняет всего одну функцию. Она только преобразует (выпрямляет) переменный ток в постоянный. При этом ртутный выпрямитель обладает относительно высоким качеством односторонней проводимости.

Коэффициент полезного действия ртутной лампы при выпрямлении переменного тока очень высокий. В этом его преимущество перед другими выпрямителями. Достигается это за счет создания дуги в ртутных парах, имеющих очень низкий потенциал ионизации, а также благодаря свойствам катода из жидкой ртути.

Величина тока определяется размерами анода и допустимой плотностью тока через него. Ток дуги сильно разогревает анод, благодаря чему создается местное повышение температуры в анодной трубке. Такое разогревание необходимо для того, чтобы вблизи от анода пары ртути не сгущались, чтобы в этом месте не было конденсации паров ртути. Только это условие обеспечивает одностороннюю проводимость прибора. Следовательно, дуговой разряд происходит не в однородном газовом промежутке, а в промежутке с большим насыщением ртутных паров внизу колбы и с небольшим насыщением вблизи анода.

Ток дуги создает и местный разогрев катода (средняя температура катодного пятна равна 200° С). Испарение

ртути с катода в месте касания дуги не имеет закономерного характера. Отметим, что весь прибор после «зажигания» освещается бледным зеленовато-голубым цветом, по тем же причинам, по каким освещаются приборы с холодным разрядом.

Характер дугового разряда в очень сильной степени зависит от содержания паров ртути на участке анод — катод. Очень большое насыщение паров приводит к пробою газового промежутка в обратном направлении (при изменении полярности электродов), что недопустимо для приборов, предназначенных для выпрямления переменного тока. Уменьшение насыщения ухудшает условия возникновения разряда, увеличивает потенциал зажигания прибора и нормальное падение напряжения на газовом промежутке. Последнее особенно неприятно, так как ведет к увеличению мощности, выделяющейся на аноде, благодаря чему недопустимо сильно разогревается анод, создавая опасность обратного зажигания лампы. Постоянство же степени насыщения паров ртути обеспечивается главным образом постоянством окружающей температуры.

Эксплуатировать выпрямитель при температуре выше +35° С и ниже —15° С нельзя. Для выполнения данных условий необходимо создавать принудительную вентиляцию воздуха, направляя поток его снизу вверх.

Поскольку дуговой разряд одного направления в парах ртути можно обеспечить только при большом насыщении паров у катода и малом насыщении их у анода, то нужно искусственно основной поток испаряющейся с катода ртути отвести от направления на анод. Для обеспечения этих условий анод помещают в узкую трубку, отведенную несколько в сторону от оси лампы. Непосредственно над катодом размещают большой резервуар, в который и направляется основной поток испаряющейся с катода ртути. Здесь пары конденсируются, покрывают холодные стенки колбы и в виде капелек стекают обратно на катод.

Весьма существеным параметром ртутной лампы является допустимое обратное напряжение. Под обратным напряжением понимают такой отрицательный потенциал на аноде лампы, при котором она теряет свойства односторонней проводимости и ток начинает проходить от катода к аноду. При выпрямлении переменного тока обратное напряжение определяет величину подводимого к выпрямителю напряжения (его амплитуду).

Повышение рабочего напряжения выпрямителя достигается удлинением анодных трубок и сужением их, что уменьшает плотность паров ртути у анодов и удлиняет путь разряда. Однако сужение трубки приводит к уменьшению размеров анода, а следовательно, и к уменьшению рабочего тока прибора. Мощные ртутные выпрямители в отличие от маломощных стеклянных делаются металлическими с водяным охлаждением.

Средняя величина выпрямленного лампой тока не поддается регулированию, что в ряде случаев затрудняет его эксплуатацию. В таких случаях применяют управляемые ртутные выпрямители или игнитроны.

Игнитроны. Игнитроном называют мощный управляемый газоразрядный прибор. Он, как и ртутный выпрямитель, имеет жидкий катод и дуговой разряд в нем тоже происходит в ртутных парах. Однако его конструкция, основные электрические свойства и происходящие в нем физические процессы существенно отличны от свойств всех ранее рассмотренных газоразрядных приборов.

Как у всех ламп с холодным катодом, ртутный катод игнитрона не разогревается посторонним источником. Разряд в нем развивается благодаря разности потенциалов между анодом и катодом с помощью специального поджигающего устройства. Принципиально поджигание игнитрона производится подобно тому, как это делается у ртутных выпрямителей. Разница заключается в том, что лампа ртутного выпрямителя зажигается вручную, а игнитрон — автоматически, в каждый положительный полупериод переменного напряжения на аноде. Зажигание игнитрона производится с помощью специальной электрической схемы.

Для уяснения существенных отличий игнитрона от ртутного выпрямителя рассмотрим принцип его действия.

В нижней части баллона игнитрона в специальном отростке помещен молибденовый стержень, на нижнем конце которого укреплен силитовый наконечник (материал наконечника не должен смачиваться ртутью, должен обладать хорошими вакуумными свойствами и большим удельным сопротивлением). Этот дополнительный электрод выполняет функцию поджигателя. Размеры поджигателя невелики, так как ток через него кратковременен и среднее значение его мало.

Для осуществления поджигания необходимо создать разность потенциалов между поджигателем и катодом.

Практически разность потенциалов между этими электродами должна быть порядка 60—100 *в*.

Силитовый наконечник поджигателя опущен в ртуть на 2—3 *мм*. Поскольку силит не смачивается ртутью, между поверхностью наконечника и вдавленной поверхностью ртути будет очень тонкий слой разреженного пространства. Электрическое поле в этом промежутке будет очень сильное (сила поля определяется отношением разности потенциалов к расстоянию между точками с разными потенциалами $E = \frac{U}{d}$, где E — сила поля, U — разность потенциалов, d — зазор между ртутью и поверхностью силитового наконечника). Так, при $U = 80$ *в* при малой величине d сила поля достигает 10^6 *в/см*. Такое поле достаточно для того, чтобы вызвать автоэлектронную эмиссию с поверхности ртути.

Как только произойдет поджигание, т. е. возникнет очаг, испускающий свободные электроны, мгновенно вспыхнет дуговой разряд между основным анодом и катодом (катодным «светлым пятном»). Задача заключается в том, чтобы поджигать прибор в такт с появлением положительного потенциала на аноде.

Поскольку игнитрон через каждые полпериода погасает и затем вновь автоматически загорается, в нем происходит процесс ионизации паров ртути и процесс деионизации их (восстановление нейтрального состояния атомов).

Во время отрицательной полуволны напряжения на аноде в пространстве между электродами будет очень мало ионизированных частиц, поэтому вероятность обратного зажигания мала и игнитрон может быть использован для выпрямления относительно высоких напряжений.

Конструкция устройства, включающего в себя игнитроны, должна быть жесткой и желательно стационарной. Постоянство температуры прибора достигается с помощью вентилятора, обдувающего прибор в направлении снизу вверх. При этом следует помнить, что желательно охлаждать только нижнюю и среднюю части колбы, но нежелательно охлаждать верхнюю часть ее. Дело в том, что пары ртути, подходя к холодным стенкам колбы, конденсируются и ртуть по стенкам в виде капелек стекает на дно сосуда. Если же верхняя часть колбы будет сильно охлаждена, пары ртути будут конденсироваться и на стенках верхней

части прибора. Допускать этого нельзя, так как капли ртути могут оторваться от стекла и упасть непосредственно на анод. Анод в рабочем состоянии сильно разогрет. Упавшая на него капля ртути быстро испарится. Вокруг анода резко увеличится плотность паров ртути, а это может повести к обратному пробою игнитрона. Для предохранения от случайных резких охлаждений верхней части баллона ее покрывают теплоизоляционным материалом (войлок, волос, шерстяная накладка).

Игнитрон еще более эффективный выпрямитель, чем ртутная лампа. Мощный дуговой разряд прибора поддерживается разностью потенциалов между электродами в 20 *в*. Подводимое к игнитрону напряжение составляет 1 000—5 000 *в*. Коэффициент полезного действия игнитрона в схеме выпрямления переменного тока — порядка 0,97—0,99.

Игнитроны широко применяются для сварки металлов. Прибор обладает весьма существенным свойством. Он может безболезненно пропускать кратковременный ток, во много раз превышающий нормальный. Катод прибора принципиально обладает неограниченной эмиссией и имеет практически неограниченный срок службы. Так же как в других газоразрядных лампах, дуговой разряд в игнитроне сопровождается свечением.

Значительным недостатком игнитрона является жидкий катод, из-за которого условия эксплуатации и транспортировки прибора сильно затруднены. Прибор требует устойчивой установки и постоянства окружающей температуры.

ФОТОЭЛЕМЕНТ

Фотоэлемент — прибор, основанный на использовании интересного физического явления, которое мы называем фотоэффектом, может быть также отнесен к числу приборов с холодным катодом.

Знакомством с фотоэлектрическим эффектом и возможностью широко и полезно использовать это физическое явление в современной физике и технике мы обязаны одному из замечательных русских ученых Александру Григорьевичу Столетову.

А. Г. Столетов впервые в мире показал, что воздушный промежуток между двумя соединенными с батареей пластинками проводит электрический ток при облучении их пучком света. Опыт А. Г. Столетова состоял в следующем.

К одному из полюсов батареи присоединялась цинковая полированная пластинка, к другому — металлическая сетка. Между пластинкой и сеткой создавался воздушный промежуток. В цепь включался контрольный прибор — гальванометр. В обычных условиях гальванометр не обнаруживал тока. Но стоило только направить луч яркого света через сетку на пластинку, как сразу же гальванометр отмечал появление тока. Это явление Столетов назвал актиноэлектрическим (сейчас мы называем его фотоэлектрическим).

Весьма важное значение имеют последующие опыты Столетова. Он изучает фотоэлектрические явления в разреженных газах, определяет закон, связывающий степень разрежения (вакуума) с величиной фототока, и устанавливает так называемую постоянную Столетова.

Сейчас наши знания о фотоэлектрических явлениях значительно пополнены благодаря главным образом работам советских физиков и инженеров. Фотоэлектрические приборы широко внедрены в народное хозяйство нашей страны. Особое место занимают они в телевидении и звуковом кино.

Сведения о фотоэлектрических приборах настолько широки и разновидности приборов представляют настолько большой самостоятельный интерес, что не могут быть здесь достаточно полно описаны. Мы рассмотрим только основной тип фотоэлектрических приборов, а именно фотоэлемент.

Как уже было отмечено, в фотоэлементах использовано явление фотоэффекта. В чем же сущность этого явления?

Под фотоэффектом мы понимаем способность различных тел испускать свободные электроны под воздействием лучистой энергии. Фотоэлектронная эмиссия есть один из способов освобождения электронов из металла. Электроны внутри металла находятся в полусвободном состоянии, т. е., свободно перемещаясь внутри металла, они все же не могут выйти за его пределы. Для освобождения электрона из металла ему должна быть сообщена дополнительная энергия. Оказывается, что освобождение одного фотоэлектрона происходит в результате поглощения порции света, называемой квантом. Световая энергия (квант) поглощается и превращается в энергию электрона. Дополнительная энергия, сообщенная электрону, дает возможность ему преодолеть так называемый потенциальный барьер и

выйти за пределы металла. Энергия, обладая которой электрон может преодолеть потенциальный барьер, называется **работой выхода**. Электрон, обладающий энергией, превышающей работу выхода, сможет не только выйти за пределы металла, но и продолжать полет, удаляясь от границы металла.

Фотоэффект подчиняется двум основным законам. Первый из них был открыт А. Г. Столетовым и позднее подтвержден работами советских ученых. Он гласит, что: *фотоэлектрический ток прямо пропорционален падающему световому потоку.* При этом предполагается, что спектральный состав света не изменяется с изменением мощности светового потока. Второй закон, открытый значительно позже, устанавливает, что: *максимальная энергия фотоэлектронов возрастает с частотой падающего света и не зависит от его интенсивности.*

Громадное, практически основное, значение для работы фотоэлемента имеет выбор облучаемого металла и способ обработки его поверхности. Исследования показали, что фототок зависит от чистоты поверхности металла. Обычно металлы не имеют чистых поверхностей, они покрыты жировыми слоями, окислами или химическими солями. Покрытия могут быть сравнительно тонкими (одно-двухатомными) и сравнительно толстыми (многоатомными). Фотоэффект при этом будет очень сильно различаться.

Фотоэлементы по своему внешнему виду подобны радиолампам. Они разделяются на две принципиально различные группы: с высокой разреженностью газа так называемые **жесткие фотоэлементы** и наполненные газом — **мягкие фотоэлементы**. В первых движение электронов в междуэлектродном пространстве происходит без столкновений с частицами оставшегося в баллоне воздуха (из-за очень высокой степени разрежения вероятность столкновения электронов с молекулами газа ничтожна). Во вторых движение электронов сопровождается столкновением с частицами газа и ионизацией его. В связи с этим в первых приборах закон токопрохождения подобен закону токопрохождения в радиолампах. Во вторых же — токопрохождение более сложно и по характеру ближе к токопрохождению в приборах тлеющим разрядом.

Что же представляет собой фотоэлемент? Каковы его основные свойства?

Вакуумный фотоэлемент. Фотоэлемент заключен в стеклянную колбу с высокой степенью разрежения воздуха. Внутрь колбы введены металлические электроды (анод и катод). Анод фотоэлемента, представляющий собой обычно небольшое колечко из никеля, расположен в центре колбы, а катод, выполняемый обычно в виде слоя цезия, нанесенного на тонкую пленку серебра или сурьмы, покрывает внутреннюю поверхность колбы. При этом часть поверхности колбы оставляют непокрытой для пропускания через нее света внутрь колбы. Наиболее распространенными фотокатодами является кислородно-цезиевый (на окисленном серебре) и сурьмяно-цезиевый (на сурьме).

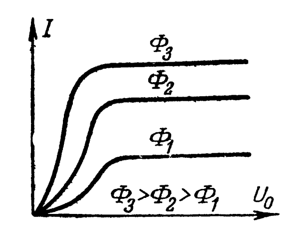
Если создать разность потенциалов между анодом и катодом фотоэлемента, но закрыть доступ света к катоду, то ток через фотоэлемент проходить не будет. Если затем осветить катод, то в цепи фотоэлемента будет проходить электрический ток. Это значит, что лучистая энергия освобождает с облучаемой поверхности катода электроны. Если доступ света увеличивать, то будет увеличиваться и ток через прибор. Изменение количества света, действующего на фотоэлемент, по производимому эффекту подобно изменению потенциала сетки радиолампы.

Способность фотоэлемента изменять величину тока с изменением количества поступающего света называется чувствительностью. Чувствительность фотоэлементов, которая измеряется в микроамперах (*мка*) на люмен (*лм* — единица светового потока), различна и зависит от материала катода и от способа его нанесения на стекло или металлическую пластинку. Так, фотоэлемент с серно-калиевым катодом имеет чувствительность всего 2—7 *мка/лм*, кислородно-цезиевый — 30—70 *мка/лм* и сурьмяно-цезиевый — 60 — 80 *мка/лм*. С течением времени чувствительность прибора снижается из-за утомляемости катода. Особенно сильно сказывается старение у фотоэлементов с кислородно-цезиевым катодом.

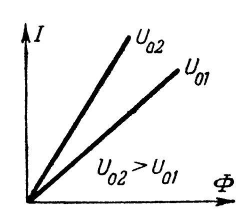
Характеристики вакуумных фотоэлементов представлены на фиг. 31 и 32. Из графика фиг. 31 следует, что при постоянном световом потоке Φ ток I фотоэлемента растет с увеличением напряжения U_0 на аноде до определенной величины. Затем наступает режим насыщения. Увеличение напряжения на аноде выше напряжения, соответствующего насыщению, только увеличивает энергию попадающих на анод электронов, но не увеличивает самого тока.

Фиг. 32 показывает, что при заданном напряжении на аноде U_{01} или U_{02} ток I через фотоэлемент линейно зависит от величины светового потока Ф. Это свойство весьма важно, ибо оно свидетельствует о том, что преобразование колебаний светового потока в электрические колебания будет происходить без искажений.

Газонаполненный фотоэлемент. В газонаполненном фотоэлементе физические явления гораздо сложнее. Газонаполненный фотоэлемент изготовляется подобно вакуумному, но после откачки воздуха в него вводится газ аргон или неон до давления $p = 0{,}02$—$0{,}04$ *мм* рт. ст.



Фиг. 31. Вольтамперные характеристики вакуумного фотоэлемента при различных световых потоках.



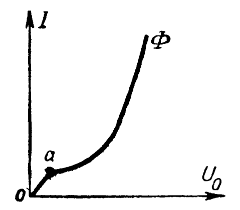
Фиг. 32. Световые характеристики вакуумного фотоэлемента при различных напряжениях.

Если создать разность потенциалов между электродами газонаполненного фотоэлемента и воздействовать на катод лучистой энергией, то через фотоэлемент будет проходить ток, значительно больший, чем в вакуумном фотоэлементе. Электроны, испускаемые катодом под действием света, будут устремляться к аноду и на своем пути встречать молекулы газа. При малых напряжениях U_0 на аноде (участок *о—а* на фиг. 33) энергия электронов еще мала и ионизации встречных частиц газа не происходит. При повышении анодного напряжения энергия электронов растет, создаются условия для ионизации газа и ток I через фотоэлемент резко увеличивается.

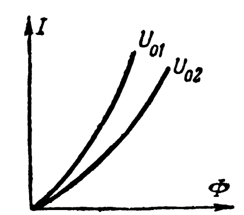
На фиг. 34 дана зависимость тока I фотоэлемента от мощности светового потока Ф. Из графика видно, что закон нарастания тока нелинеен. Следовательно, преобразование колебаний светового потока в электрические с помощью газонаполненного фотоэлемента будет сопровождаться искажениями.

Из сравнения работы вакуумного и газонаполненного фотоэлементов видно, что первый по ряду параметров превосходит второй. Однако ток газонаполненного фотоэлемента значительно больше, его чувствительность к колебаниям светового потока гораздо выше. Так, у фотоэлементов с серно-калиевым катодом она равна 90—100 *мка/лм* и у фотоэлементов с кислородно-цезиевым катодом составляет 300—700 *мка/лм.*

Газонаполненный фотоэлемент интересен тем, что происходящие в нем физические процессы имеют сходство и с процессами, происходящими в электронных лампах, и с процессами, происходящими в газоразрядных приборах. Действительно, при малых анодных напряжениях освещенный газонаполненный фотоэлемент ведет себя так же, как вакуумный. Повышение напряжения переводит фотоэлемент



Фиг. 33. Вольтамперная характеристика газонаполненного фотоэлемента.



Фиг. 34. Световые характеристики газонаполненного фотоэлемента при различных напряжениях.

в режим, подобный холодному разряду. Однако стоит только прекратить освещение фотоэлемента, как сразу же прекратится разряд.

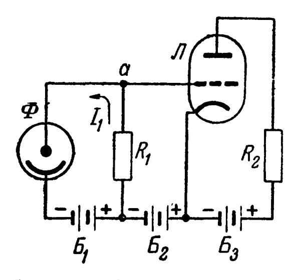
Таким образом, разряд в газонаполненном фотоэлементе происходит под воздействием внешних факторов. И хотя сам разряд холодный, способ образования его имеет большое сходство со способом образования дугового разряда в газонаполненной лампе с накаленным катодом (газотрон, тиратрон), хотя в последней катод подогревается, а в фотоэлементе он освещается. И в том и в другом случае для создания электронного потока затрачивается мощность постороннего источника. Только в дуговых приборах эта мощность велика, а в фотоэлементах чрезвычайно мала.

Итак, газонаполненный фотоэлемент может быть отнесен к категории приборов с холодным катодом, но при этом

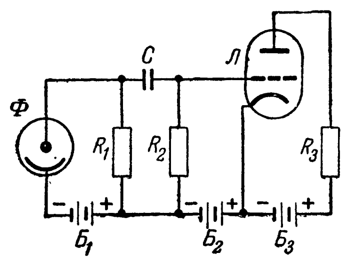
следует помнить, что разряд в нем несамостоятельный. Этим он в значительной степени отличается от наиболее близких к нему приборов с холодным разрядом.

Схемы. Фотоэлементы из-за весьма малой их выходной мощности не могут использоваться в электрических схемах без дополнительного усиления их токов.

На фиг. 35 представлена схема усиления постоянного тока. Ток батареи $Б_1$ проходит через фотоэлемент $Ф$ и сопротивление R_1. Величина тока I_1 определяется количеством света, попадающего на катод фотоэлемента. С изменением светового потока изменяется внутреннее сопротивление фотоэлемента и происходит перераспределение напряжения в цепи. Следовательно, потенциал точки a (сетка



Фиг. 35. Схема усиления постоянного тока фотоэлемента.



Фиг. 36. Схема усиления переменного тока фотоэлемента.

лампы) будет изменяться с изменением светового потока. Лампа работает без сеточных токов. Смещение обеспечивается батареей $Б_2$. Анодное питание лампы осуществляется с помощью батареи $Б_3$. В анодную цепь лампы $Л$ включено нагрузочное сопротивление R_2, с которого и снимается усиленное напряжение.

На фиг. 36 дана схема усиления переменного тока. Предполагается, что фотоэлемент облучается переменным световым потоком.

При необходимости усиление можно осуществлять и с многоламповой схемой. Для повышения чувствительности схемы к изменениям светового потока целесообразно сразу вслед за фотоэлементом поставить лампу с большим коэффициентом усиления, а уже вслед за ней использовать лампу для усиления мощности.

Цена 1 р. 45 к.